

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

ELEKTRICKÉ A DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI ORGANICKÝCH
MATERIÁLŮ PRO FOTOVOLTAICKÉ APLIKACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL FLORIÁN

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

FACULTY OF CHEMISTRY

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

ELEKTRICKÉ A DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ PRO FOTOVOLTAICKÉ APLIKACE

ELECTRIC AND DIELECTRIC PROPERTIES OF ORGANIC MATERIALS FOR PHOTOVOLTAIC
APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL FLORIÁN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. OLDŘICH ZMEŠKAL, CSc.

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	FCH-DIP0801/2013	Akademický rok: 2013/2014
Ústav:	Ústav fyzikální a spotřební chemie	
Student(ka):	Bc. Pavel Florián	
Studijní program:	Spotřební chemie (N2806)	
Studijní obor:	Spotřební chemie (2806T002)	
Vedoucí práce	prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.	
Konzultanti:		

Název diplomové práce:

Elektrické a dielektrické vlastnosti organických materiálů pro fotovoltaické aplikace

Zadání diplomové práce:

1. Rešerše na téma využití organických materiálů ve fotovoltaických aplikacích
2. Měření a interpretace volt-ampérových charakteristik struktur s organickými polovodiči
3. Měření a interpretace výsledků impedanční spektroskopie
4. Zpracování výsledků do diplomové práce

Termín odevzdání diplomové práce: 9.5.2014

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

Bc. Pavel Florián
Student(ka)

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.
Vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2014

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje využití organických materiálů ve fotovoltaických aplikacích a studiu jejich elektrických a dielektrických vlastností.

Teoretická část práce pojednává o problematice využití organických polymerních materiálů ve fotovoltaice a jejich výhodách a nevýhodách. Dále jsou uvedeny výsledky různých výzkumů organických solárních článků jiných autorů. V praktické části práce jsou uvedeny experimentální výsledky (volt-ampérové charakteristiky a impedanční spektra) vzorků vybraných organických polovodičů a jejich vyhodnocení.

ABSTRACT

Diploma thesis deals with the use of organic materials in photovoltaic applications and the study of their electric and dielectric properties.

The theoretical part of thesis deals issue of the use of organic polymeric materials in photovoltaics and their advantages and disadvantages. Next are the results of various studies of organic solar cells by other authors. In the practical part of the work are shown experimental results (volt-ampere characteristics and impedance spectra) of samples of organic semiconductors and their evaluation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Organické polovodiče, konjugované polymery, organické fotovoltaické články (OPV), účinnost fotovoltaické přeměny (*PCE*), objemová heterogenní struktura, volt-ampérové charakteristiky, impedanční spektra

KEYWORDS

Organic semiconductors, conjugated polymers, organic photovoltaics cells (OPV), power conversion efficiency (*PCE*), bulk heterojunction structure, volt-amper characteristics, impedance spectra

Florián, P. *Elektrické a dielektrické vlastnosti organických materiálů pro fotovoltaické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 51 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího práce a děkana FCH VUT.

.....
Podpis studenta

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. za jeho vedení, odborné rady a trpělivost při sepisování této práce. Dále děkuji všem lidem v mém životě za to, že se podíleli na utváření mých životních zkušeností.

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1	Koncept organické fotovoltaiiky	7
2.2	Parametry fotovoltaiických článků	9
2.2.1	Účinnost přeměny	9
2.2.2	Napětí naprázdno	9
2.2.3	Faktor plnění	10
2.2.4	Proud nakrátko	10
2.2.5	Dielektrické vlastnosti fotovoltaiických článků	11
2.3	Fotoaktivní materiály používané v organické fotovoltaiice	14
2.3.1	P ₃ HT	14
2.3.2	PCBTDPDP	17
2.3.3	PCDTBT	18
2.3.4	MDMO-PPV	19
2.3.5	DPP	20
2.3.6	PBDTTT-C	21
2.3.7	Ftalocyaniny	22
2.4	Účinnost a cena fotovoltaiických článků s organickými polovodiči	25
2.5	Metody přípravy tenkých vrstev	25
2.5.1	Rotační nanášení	25
2.5.2	Nanášení kapek	26
2.5.3	Materiálový tisk	27
2.5.4	Napařování	29
3	Experimentální část	30
3.1	Příprava tenkých vrstev	30
3.1.1	Předtisková příprava	30
3.1.2	Tisk vrstev	30
3.1.3	Kontaktování a zapouzdření	31
3.2	Experimentální metody	31
3.2.1	Optická mikroskopie	31
3.2.2	Sluneční simulátor v kombinaci se stejnosměrným a střídavým měřením	32
3.2.3	Volt-ampérové charakteristiky	32
3.2.4	Impedanční spektra	34
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	35
4.1	Optická mikroskopie	35
4.2	Vyhodnocení VA charakteristik vzorku 4C	36
4.3	Vyhodnocení impedančních spekter vzorku 4C	39
4.4	Souhrnné výsledky	41
5	ZÁVĚR	43
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	49

1 ÚVOD

Fotovoltaické články jsou v současné době nejpoužívanější zároveň přenositelný a obnovitelný zdroj elektrické energie. Klasické fotovoltaické články mají díky drahému zpracování anorganických polovodičů vysoké výrobní náklady, proto je zájem o možnost využít polovodičové součástky na bázi tenkovrstvých organických materiálů vyráběných například tiskem nebo nanášením na navíjejší se roli a chráněných pomocí laminačních technik. Organické materiály umožňují návrh polovodičů s požadovanými vlastnostmi a tiskové techniky (inkoustový tisk, flexotisk a ofsetový tisk) byly přizpůsobeny pro dnešní polovodivé polymery ke splnění obecných požadavků elektroniky a displejů. Výrobní procesy organických solárních článků mají mnoho atraktivních vlastností, například ekologičnost a ekonomičnost. Je zde také možnost použití kontinuálního tiskového procesu, možnost vytváření velkých ploch a výroby transparentních a mechanicky flexibilních solárních článků. Klasická fotovoltaika zatím organickou fotovoltaiku překovává v účinnosti fotovoltaické konverze, životnosti solárních článků a cenových nákladech na výrobu elektrické energie, což jsou základní požadavky pro fotovoltaické technologie a komerčně vyráběné organické solární články musí co možná nejlépe splňovat tyto požadavky [1].

2 TEORETICKÁ ČÁST

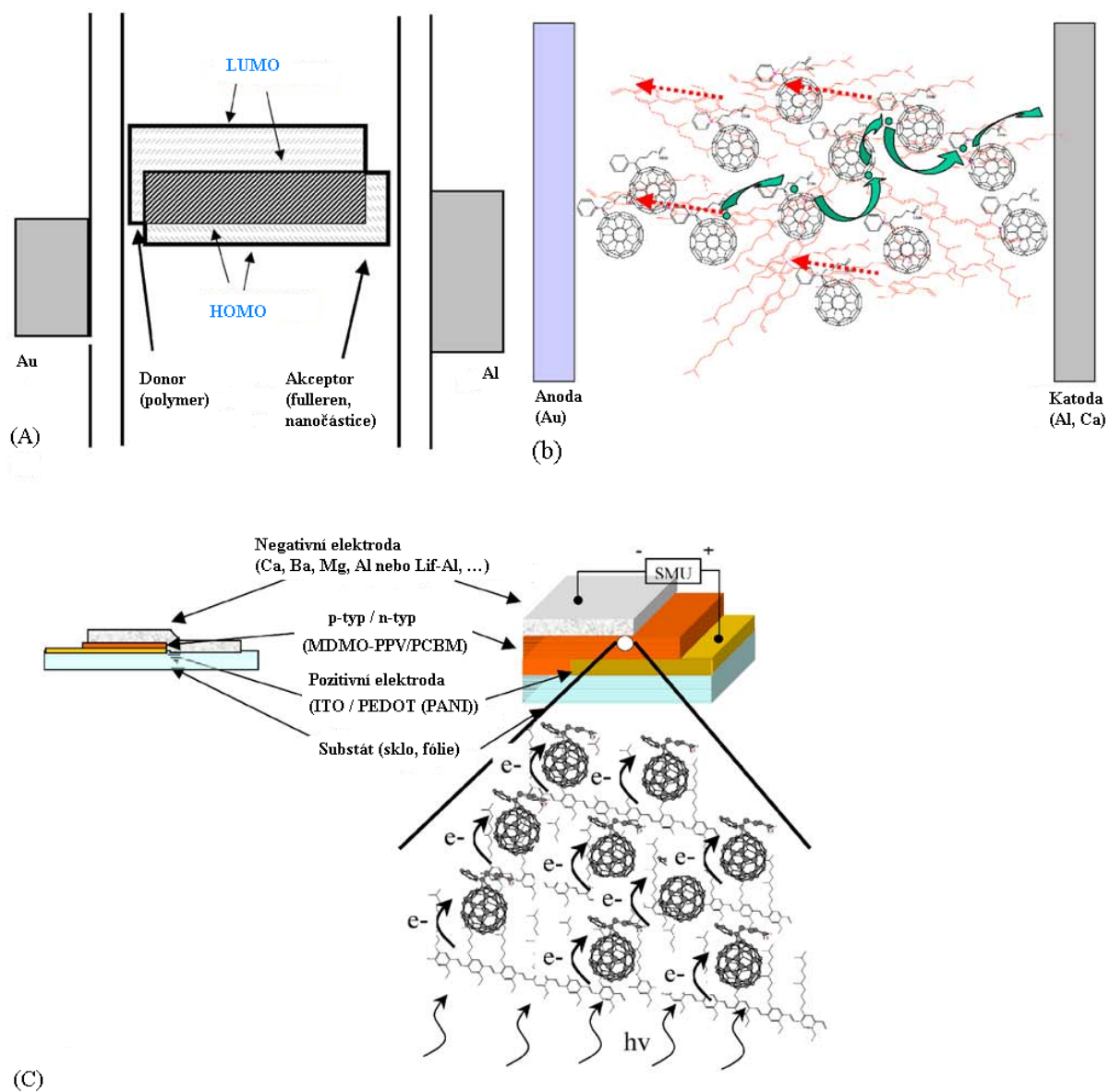
2.1 Koncept organické fotovoltaiky

Většina organických polovodičů jsou vlastní polovodiče, kde primární excitací je vznik coulombického vazebného excitonu. Fotovoltaické články s jedním organickým polovodivým materiálem dosahují nízké účinnosti fotovoltaické konverze (*PCE*) a externí kvantové účinnosti (*EQE*), vyjadřující poměr počtu párů elektron-díra na výstupech polovodiče a fotoexcitací. Pro anorganické solární články je hodnota *EQE* přibližně rovná 100 %, zatímco polovodičové vrstvy skládající se z jednoho organického polymeru mají nejčastěji hodnotu *EQE* kolem 1 %. V roce 1995 byl tento problém vyřešen tak, že byla použita místo vrstvy jednoho organického polovodiče vrstva směsi dvou různých organických polovodičů, kde jeden vedl kladný náboj a druhý záporný náboj, rozdíl v elektronových afinitách obou materiálů ve vrstvě způsobil rozdělení nábojů z fotogenerovaných excitonů do obou materiálů. Protože je rozhraní obou materiálů v celé vrstvě, fotogenerované excitony mají (pokud je přenos náboje výrazně rychlejší než rychlost rekombinace) větší tendenci se dostat k rozhraní a rozdělit náboje před svou rekombinací. Oddělené náboje poté musí cestovat polovodivými materiály k elektrodám. Koncept smíchání polovodičů typu p (s děrovou vodivostí) a polovodičů typu n (s elektronovou vodivostí) je znám pod názvem objemová heterogenní směs a u ní lze dosáhnout hodnoty *EQE* kolem 80 % [1].

Bohužel celková *PCE* organických fotovoltaických článků je poměrně malá (byla prezentována účinnost kolem 5 %). Jedním z důvodů nízké *PCE* při vysoké *EQE* je nesoulad mezi absorpčními spektry organických polovodičů a slunečním spektrem. Mnoho současných organických polovodičů absorbuje hlavně ve viditelném spektru, zatímco sluneční záření má maximální fotonovou hustotu při vlnové délce okolo 700 nm. Dalším problémem organických polovodičů je jejich omezená životnost, způsobená excitacemi elektronů do antivazebných energetických hladin, to má za následek zvýšení pravděpodobnosti rozpadu látky [1].

Efektivní fotovoltaický článek s objemovou heterogenní směsí musí mít efektivní přenos nábojů ke kontaktům s kontinuální cestou (viz Obr. 1 (b)) a energie vazeb materiálů v objemové heterogenní struktuře musí být v kaskádě (viz Obr. 1 (a)) [1].

Na Obr. 1 (c) je uveden model organického solárního článku s objemovou heterogenní strukturou (bulk-heterojunction structure) užívající MDMO-PPV jako donor elektronů a PCBM jako akceptor elektronů. ITO je použito jako polopropustný substrát s transmitancí viditelného světla okolo 90 %. PEDOT:PSS byl na ITO vrstvu nanesen rotačním nanášením z vodného roztoku. Potom byla nanesená fotoaktivní vrstva přibližně 100 nm MDMO-PPV:PCBM na vrstvu PEDOT:PSS. Katoda (negativní elektroda, například Ca/Al, Ba/Al, LiF/Al) zde byla nanesená pomocí tepelného napařování přes stínící masku [1].



Obr. 1: Schéma elektronových hladin donoru, akceptoru a elektrod u solárního článku s objemovou heterogenní směsí (a), znázornění struktury objemové heterogenní směsi (b), znázornění struktury solárního článku s objemovou heterogenní směsí (c) [1]

2.2 Parametry fotovoltaických článků

2.2.1 Účinnost přeměny

Účinnost fotovoltaické přeměny PCE je základní parametr solárních článků, týkající se nákladů na výrobu elektrické energie. Účinnost solárních článků je počítána podle rovnice

$$PCE = U_{oc} I_{sc} FF / P_{light} , \quad (1)$$

kde U_{oc} je napětí naprázdno, I_{sc} proud nakrátko, FF faktor plnění, P_{light} výkon dopadajícího záření. Pro měření pomocí solárních simulátorů s AM1.5 spektry lze použít rovnici

$$PCE_{AM1.5} = \frac{P_{out}}{P_{in}} M = \frac{U_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} M , \quad (2)$$

kde P_{out} je výstupní výkon solárního článku, P_{in} je vstupní výkon záření solárního simulátoru, M je faktor vyjadřující spektrální nesoulad mezi výstupním spektrem solárního simulátoru a standardním AM1.5 spektrem. Pro měření se solárními simulátory používajícími kovo-halogenidové lampy je $M \approx 0,76$ a pro simulátory s xenonovou lampou je $M \approx 0,9$ [1].

2.2.2 Napětí naprázdno

Solární články jsou polovodiče, ve kterých po ozáření viditelným světlem dochází k vytváření volných nosičů nábojů. Po vytvoření volných nosičů nábojů je přebytek jejich energie ztracen interakcemi s mřížkou (fonony). Po tomto ohřívajícím procesu jsou nosiče nábojů v rovnováze ve svých pásmech, než jsou vzájemně rekombinovány. Hustota nosičů nábojů je dána dvěma Fermiovými distribucemi, jednou pro elektrony a druhou pro díry. Tento koncept platí pro polovodiče pod osvětlením. Elektronová a děrová hustota jsou dány rovnicemi

$$n_e = N_c \exp\left(-\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{FC}}{kT}\right), n_h = N_v \exp\left(-\frac{\varepsilon_{FV} - \varepsilon_v}{kT}\right), \quad (3)$$

kde N_c a N_v jsou efektivní hustoty energetických stavů vodivostního a valenčního pásu, ε_c , ε_v , ε_{FC} a ε_{FV} jsou energie vodivostního pásu, valenčního pásu, elektronové kvazi-Fermiovy hladiny a děrové kvazi-Fermiovy hladiny. Výsledné n_e n_h dává [1]

$$n_e n_h = n_i^2 \exp\left(\frac{\varepsilon_{FC} - \varepsilon_{FV}}{kT}\right). \quad (4)$$

Tato difference mezi kvazi-Fermiovými hladinami je horním limitem pro U_{oc} . Pro fotovoltaická zařízení využívající tenké filmy je vestavěný elektrický potenciál hlavní parametr z důvodu ovlivňování disociace, přenosu a sběru nosičů nábojů. Obecný předpoklad je, že vnitřní potenciál polovodiče je dán U_{oc} , které je nižší, než vestavěný elektrický potenciál a konverguje k němu při nízkých teplotách. Smíchání fullerenu s konjugovanými polymery do kompozitní aktivní vrstvy mění charakter tenkovrstvých zařízení ve srovnání se samotnými konjugovanými polymery a následně i U_{oc} odpovídajících solárních článků. K analýze U_{oc} solárních článků s objemovou heterogenní strukturou byly použity různé elektrody [1].

Pro výpočet U_{oc} byla navržena tato empirická rovnice

$$V_{oc} = S_4 A_{OX} + S_4 (\varphi_{M1} - A_{OX}) - S_1 E_{red(A)} - S_2 (\varphi_{M2} - E_{red(A)}), \quad (5)$$

kde $E_{\text{red(A)}}$ je redukční potenciál akceptoru, A_{ox} je oxidační potenciál donoru, Φ_{M1} a Φ_{M2} jsou výstupní práce katody a S_1 , S_2 , S_3 a S_4 jsou korelační konstanty [1].

2.2.2.1 Vliv katody

Aby bylo možné zkoumat parametry ovlivňující vestavěný potenciál v solárních článcích s objemovou heterogenní směsí, byla zkoumána série vysoce rozpustných derivátů fullerenu v odpovídajících zařízeních. Mezi zkoumané materiály patří PCBM a fulleren C_{60} . PCBM je zvolen jako referenční elektronový akceptor pro různé elektrody s rozdílnou pracovní funkcí. Solární články prezentované v [1]: s Au katodou, která má výstupní práci 5,1 eV má solární článek $U_{\text{OC}} = 0,65$ V, při náhradě Au katody Ca katodou, která má výstupní práci 2,87 eV vzroste U_{OC} na 0,814 V [1].

2.2.2.2 Vliv anody

Jako anoda se u organických solárních článků používá nejčastěji PETOT:PSS. U solárního článku se strukturou ITO/PEDOT/MDMO-PPV:PCBM/Al prezentovaného v [1] bylo zjištěno, že jeho zabudovaný potenciál stoupá s hodnotou výstupní práce PEDOT:PSS elektrody, která může být měněna elektrochemicky.

2.2.3 Faktor plnění

Pro praxi v oblasti solárních článků se používá jejich aproximace obvodem, který obsahuje také sériový odpor a paralelní odpor. Diodový proud v solárním článku je dán rovnicí

$$\ln \left(\frac{(I_v + I_{\text{sc}})}{I_0} - \frac{(U - IR_s)}{I_0 R_p} + 1 \right) = \frac{q(U - IR_s)}{nkT}, \quad (6)$$

Kde I , I_0 , R_s , R_p , n a kT/q jsou procházející proud, saturační proud, sériový a paralelní odpor, faktor ideality diody, teplotní potenciál (při pokojové teplotě okolo 0,025 V) a I_v vstupní proud při vstupním napětí U . Pokrok ve vývoji solárních článků s objemovou heterogenní směsí představuje například použití LiF vrstvy mezi fotoaktivní vrstvou a hliníkovou katodou, tato technika je používána například v OLED diodách. Vložením tenké vrstvy LiF mezi katodu a fotoaktivní vrstvu dosáhneme zlepšení kontaktu, následného zmenšení sériového odporu a zvýšení U_{OC} a FF [1].

2.2.4 Proud nakrátko

Objemová heterogenní směs pomáhá překonat omezení dvojvrstvého systému s materiály s nízkou pohyblivostí nosičů nábojů. Je známo, že objemová heterogenní struktura s velkou hustotou rozhraní donor/akceptor umožňuje fotoindukované vytváření volných nosičů nábojů a jejich přenos k elektrodám. Vytvoření směsi bez fázové separace PCBM (případně jiných metanofullerenů) je poměrně jednoduché a zvyšuje to stupeň interakcí mezi řetězcí konjugovaného polymeru. Zvýšením pohyblivosti nosičů nábojů v polymerním polovodiči je zvýšen proud nakrátko I_{SC} a PCE . Jakmile vzniknou fotoexcitací volné nosiče nábojů (metastabilní stav), jsou urychleny a difundovány k elektrodám. Hnací silou jejich urychlení je rozdíl výstupních prací elektrod, což vytváří vestavěné elektrické pole v aktivní vrstvě, ve které se volné elektrony pohybují v molekulách metanofullerenů a díry v konjugovaném polymeru. Bylo prokázáno, že směs MDMO-PPV s PCBM v poměru 1:4 má stejnou nebo nepatrně nižší pohyblivost děr oproti čistému MDMO-PPV [1].

MDMO-PPV má často hmotnostně průměrnou molární hmotnost M_w kolem 10^6 g/mol a polydiperzitu (poměr hmotnostně průměrné molární hmotnosti a početně průměrné molární hmotnosti M_w/M_n) menší, než 2. Distribuce velikosti částic je zjišťována pomocí měření rozptylu světla a může být vyjádřena jako objemová distribuce nebo početní distribuce. Roztok chlorbenzenu s dostatečnou koncentrací MDMO-PPV se chová více jako koloidní systém, než jako roztok, protože zde dochází k agregaci částic [1].

Přenos volných nosičů nábojů po polymerním řetězci je rychlý proces, zatímco jejich přenos mezi polymerními řetězci vyžaduje přeskoky a měření pohyblivosti nosičů nábojů v MEH-PPV vykazuje obvykle hodnoty asi o čtyři řády nižší, než je pohyblivost volných nosičů nábojů po řetězci. U Fullerenů je jejich uzavřený obal dobrým předpokladem pro vysokou pohyblivost volných elektronů. Důsledkem toho je, že směs polovodiče typu p a n s větší pohyblivostí nosičů nábojů vede ke zvýšení *PCE* [1].

2.2.5 Dielektrické vlastnosti fotovoltaických článků

Impedance Z vyjadřuje rezistanci (R) a reaktanci (X) elektronických prvků při průchodu harmonického střídavého proudu dané frekvence. Ze znalosti závislosti impedance na frekvenci střídavého proudu lze určit například fázový posun mezi napětím a proudem, charakterizovat vlastnosti daného prvku a zkonstruovat náhradní obvod elektronického prvku, na Obr. 4 jsou uvedeny náhradní obvody různých elektronických součástek [2].

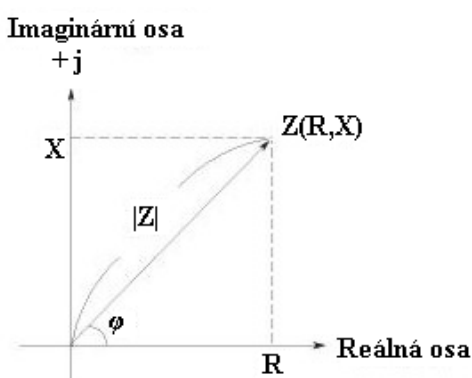
Hodnota impedance je vyjádřena komplexním číslem

$$Z = R + jX, \quad (7)$$

kde j je imaginární jednotka, R je rezistance a X je reaktance. Absolutní hodnota impedance a fázový posun φ jsou dány vztahy

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \varphi = \arctan \frac{X}{R}, \quad (8)$$

kde $R = |Z|\cos\varphi$, $X = |Z|\sin\varphi$, jsou zobrazeny v rovině komplexních čísel na Obr. 2 [2].



Obr. 2: Znárodnění impedance, rezistance, reaktance a fázového posunu [2]

Impedance ideálního rezistoru Z má pouze reálnou část nazývanou rezistance, jejíž hodnota nezávisí na frekvenci [2]

$$|Z_R| = R. \quad (9)$$

Reaktanci dělíme na indukčnici X_L (kladnou reaktanci) a kapacitanci X_C (zápornou reaktanci). Induktance představuje reaktanci cívky, závisí na frekvenci, v jejím důsledku je proud opožděn za napětím o určitý fázový úhel. Ideální cívka (induktor) má pouze imaginární část impedance s fázovým posunem 90° definovanou vztahem

$$|Z_L| = X_L = \omega L = 2\pi fL, \quad (10)$$

kde L je indukčnost cívky, ω je fázová rychlost a f je frekvence střídavého proudu [2].

Kapacitance je reaktance kondenzátoru, v jejím důsledku naopak proud předbíhá napětí o určitý fázový úhel. Ideální kondenzátor má pouze imaginární část impedance s fázovým posunem -90° definovanou vztahem

$$|Z_C| = X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (11)$$

kde C je elektrická kapacita kondenzátoru [2].

Případ, kdy mají v obvodu indukčnice a kapacitance stejné hodnoty se nazývá rezonance, fázový posun je 0° , v sériovém zapojení cívky a kondenzátoru (sériová rezonance) má impedance hodnotu rezistance a v paralelním zapojení cívky a kondenzátoru se naopak hodnota impedance zvyšuje (paralelní rezonance) [2].

Pro měření a charakterizaci paralelních obvodů je vhodnější použít místo impedance (střídavého odporu) admitanci (vodivost pro harmonický střídavý proud) definovanou vztahem

$$Y = G + jB, \quad (12)$$

kde G je konduktance a B susceptance. Konduktance představuje frekvenčně nezávislou reálnou část admitance, zatímco susceptance frekvenčně závislou imaginární část admitance. Pro velikost admitance a fázový posun platí vztahy

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad \varphi = \arctan \frac{B}{G}, \quad (13)$$

kde $G = |Y|\cos\varphi$, $B = |Y|\sin\varphi$, jsou znázorněny v rovině komplexních čísel na Obr. 3 [2].

Fázový posun má u admitance opačnou hodnotu, než u impedance, u ideálního kondenzátoru tedy je 90° a u ideální cívky -90° [2].

Pro přepočet mezi impedancí a admitancí platí vztahy

$$Z = R_s + jX_s = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_p + jB_p} = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2} - j \frac{B_p}{G_p^2 + B_p^2}, \quad (14)$$

$$Y = G_p + jB_p = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} - j \frac{X_s}{R_s^2 + X_s^2}, \quad (15)$$

$$D = \frac{R_s}{X_s} = \frac{G_p}{B_p}, \quad (16)$$

kde R_s je sériová rezistance, X_s je sériová reaktance, G_p je paralelní konduktance, B_p je paralelní susceptance a D je ztrátový faktor. Z pomoci těchto vztahů se dají odvodit vztahy

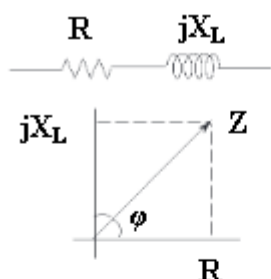
$$R_s = \frac{G_p}{G_p^2 + B_p^2} \Rightarrow R_s = \frac{R_p D^2}{1 + D^2}, \quad (17)$$

$$G_p = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow R_p = R_s \left(1 + \frac{1}{D^2} \right), \quad (18)$$

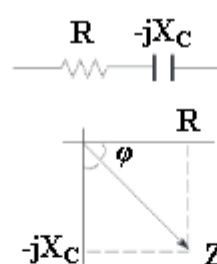
$$X_s = \frac{-B_p}{G_p^2 + B_p^2} \Rightarrow X_s = \frac{X_p}{1 + D^2}, \quad (19)$$

$$B_p = \frac{-X_s}{R_s^2 + X_s^2} \Rightarrow X_p = X_s (1 + D^2), \quad (20)$$

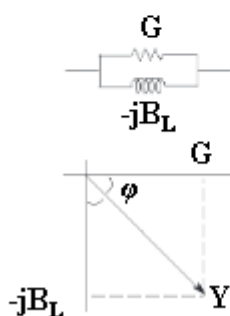
kde R_p je paralelní rezistance a X_p paralelní reaktance [2].



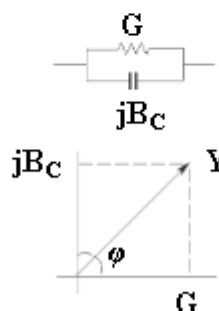
(a) Induktivní vektor
reprezentovaný v rovině impedance



(b) Kapacitní vektor
reprezentovaný v rovině impedance

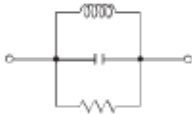
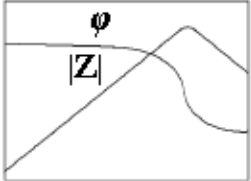
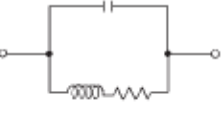
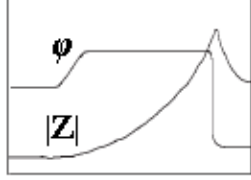
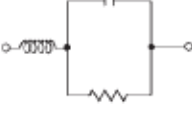
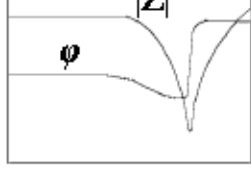
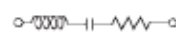
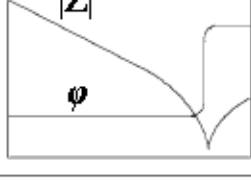
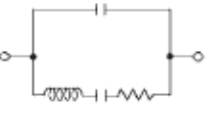
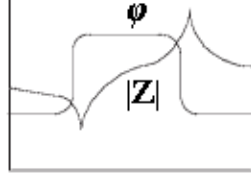


(c) Induktivní vektor
reprezentovaný v rovině admittance



(d) Kapacitní vektor
reprezentovaný v rovině admittance

Obr. 3: Znázornění složek vektorů impedance sériového zapojení rezistoru a cívky (a), sériového zapojení rezistoru a kondenzátoru (b), složek vektorů admittance paralelního zapojení rezistoru a cívky (c) a paralelního zapojení rezistoru a kondenzátoru (d) [2]

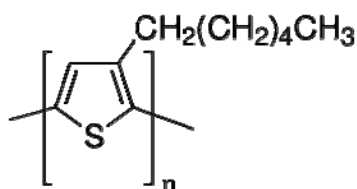
Náhradní obvod	Elektronická součástka	Impedanční spektra
A 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cívka s vysokou ztrátou ◦ v jádru 	
B 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cívka v obecném ◦ rezistoru 	
C 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Rezistor s vysokým ◦ jmenovitým odporem 	
D 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Kondenzátory 	
E 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Rezonátory (krystaly, keramické) 	

Obr. 4: Náhradní obvody různých elektronických součástek a jejich závislosti velikosti impedance a fázového posunu na (zleva doprava stoupající) frekvenci [2]

2.3 Fotoaktivní materiály používané v organické fotovoltaice

2.3.1 P₃HT

P₃HT neboli Poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl) je polymerní materiál obsahující π -konjugované vazby a chovající se jako polovodič typu p, jeho struktura je uvedena na Obr. 5 P₃HT dodávaný firmou Sigma Aldrich má M_n mezi 54 000 a 75 000 g/mol. Za běžných teplot je P₃HT pevná látka s teplotou tání 238 °C. P₃HT má hladinu HOMO = 5 eV a LUMO = 3 eV [1]. P₃HT se používá v OLED a PLED světlo emitujících diodách, OFET tranzistorech a organických solárních článcích [3].

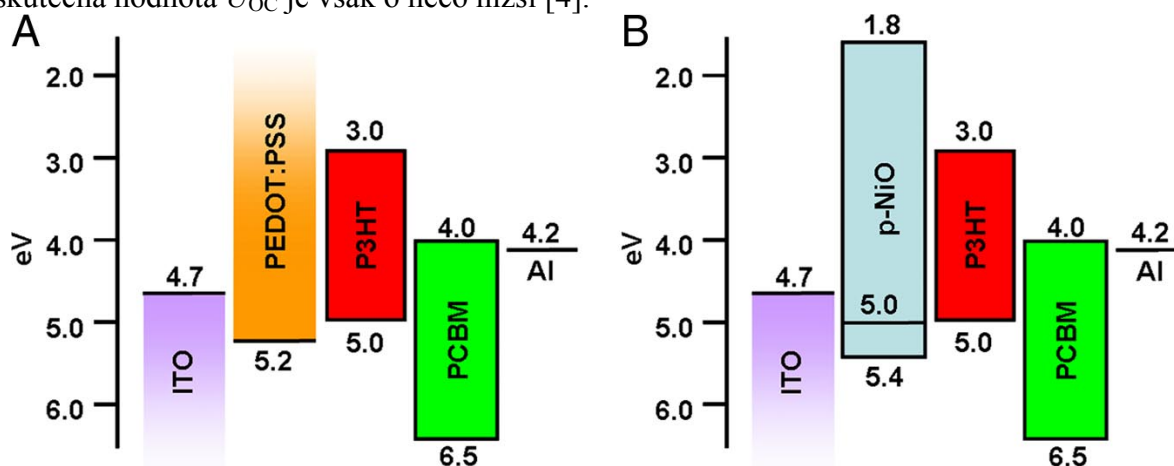


Obr. 5: Struktura P3HT [2]

Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO/NiO/P₃HT:PCBM/LiF/Al, prezentovaný v [4] měl $J_{SC} = 11,3 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,64 \text{ V}$ a $FF = 0,69$ při $PCE = 5,16 \%$ za osvětlení solárním simulátorem s xenonovou lampou simulujícím AM 1.5G světlo. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Sklo s nanesenou ITO vrstvou (25 mm·75 mm) bylo vzorkováno dvěma elektricky separovanými 3 mm pruhy aplikováním masky a nanesením horké HCl na 10 s. Sklo s ITO vzorem bylo následně ponořeno do nasyceného roztoku NaHCO_3 , vysušeno a čištěno v hexanu 30 min při 50 °C za působení ultrazvuku. Následně bylo sklo s ITO vzorem rozřezáno na substráty o rozměrech 25·12,5 mm, které byly dále čištěny působením ultrazvuku ve vodě s detergentem při 50 °C 30 min, dále v destilované vodě 5 min, 30 min v metanolu, 30 min v izopropanolu a 30 min v acetonu. Po vypaření rozpouštědel byly substráty čištěny 10 min v UV ozonovém čističi při atmosférické teplotě. Následně byla nanášena 10 nm vrstva NiO pomocí pulzní laserové depozice. Vzorování NiO tenké vrstvy bylo zajištěno použitím stínící masky. K následnému nanesení fotoaktivní vrstvy, byl použit roztok 20 mg P₃HT a 20 mg PCBM v 1 ml o-dichlorbenzenu, roztok byl přechováván v dusíkové atmosféře, ve které bylo také provedeno jeho nanesení rotačním nanášením při 550 ot/min jednominutovým rotačním nanášením a zvýšením otáček na 2 000 ot/min na 1 s. Tloušťka nanesené vrstvy byla mezi 210 a 230 nm. Kontakty byly následně vyčištěny suchým toluenem a vatovým tampónem, substráty žilány 10 min při 120 °C a nanášeny LiF/Al katody vakuovým napařováním přes stínící masku při tlaku $1,1 \cdot 10^{-6}$ Torr. Katody tvořily dva 2 mm pásy kolmé na dva ITO pásy a nakonec byl solární článek zapouzdřen ve světle tvrditelném epoxidu (Electro-Lite ELC-2500), který byl vytvrzen UV zářením [4].

PCE by snižovalo použití jiné tloušťky vrstvy NiO, případně nepoužití vrstvy NiO. Hladiny HOMO a LUMO použitých materiálů jsou uvedeny na Obr. 6. Teoretická hodnota U_{OC} zde tvoří rozdíl mezi hladinami HOMO donorového materiálu a LUMO akceptorového materiálu, skutečná hodnota U_{OC} je však o něco nižší [4].



Obr. 6: Energie HOMO a LUMO energetických hladin vztažené k energetické hladině vakua pro použité materiály (Hladiny LUMO proto jsou výše, než hladiny HOMO, přestože mají nižší energii). [4].

Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/P₃HT:PCBM (10:8)/Al prezentovaný v [5] měl $J_{SC} = 9,5 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,63 \text{ V}$, $FF = 0,68$ při $PCE = 5 \%$ za osvětlení solárním simulátorem s xenonovou lampou (150 W Oriel), AM 1.5 filtrem a velikostí osvětlené plochy aktivní vrstvy $14,8 \text{ mm}^2$. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Sklo s nanosenou ITO vrstvou bylo nejdříve vyčištěno detergentem, dále v acetonu a izopropylalkoholu za působení ultrazvuku a následně sušeno v troubě přes noc. Vysoce vodivý PEDOT:PSS byl nanesen rotačním nanášením při 5 000 ot/min z vodného roztoku (přefiltrovaného 0,45 μm filtrem). Substrát byl sušen 10 min při 140 °C na vzduchu a pak nanesena rotačním nanášením při 700 ot/min fotoaktivní vrstva z roztoku chlorbenzenu obsahujícího 10 mg/cm³ P₃HT a 8 mg/cm³ PCBM. Tloušťka fotoaktivní vrstvy byla zvolena tak, aby byla její absorpance pro světlo použité při měření spektra přibližně rovná 0,5, pro kterou byla zjištěna nejvyšší účinnost. Tenčí vrstva by zachytila méně fotonů a tlustší vrstva by měla vyšší sériový odpor, lepší účinnosti by bylo dosaženo například použitím dvou překrývajících se solárních článků, zlepšením absorpce světla nebo zvýšením pohyblivosti volných nosičů nábojů. Následně byl solární článek dán do vakua (s tlakem menším, než 10^{-7} Torr, 1 Torr = 133,322 Pa), kde byla nanesena přibližně 100 nm vrstva Al. Potom bylo provedeno žihání při 150 °C 60 min v plynném N₂ [5].

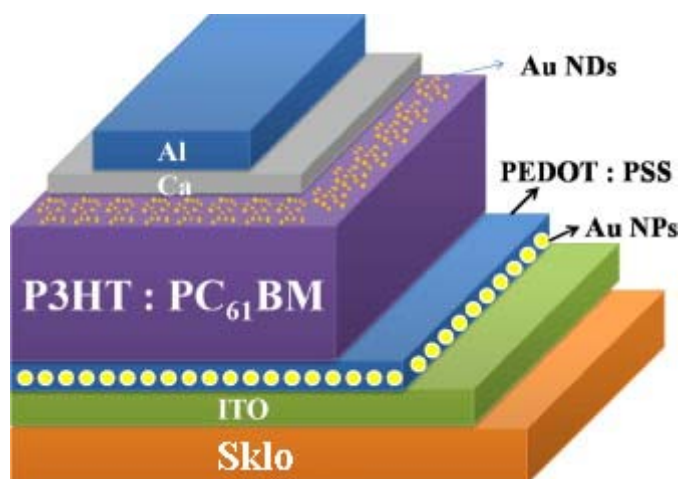
PCE by zde snížilo: provedení žihání před nanášením Al vrstvy, použití vyšší nebo nižší žihací teploty, zkrácení doby žihání při 150 °C a vynechání žihání. Zvýšení *PCE* vlivem žihání zde bylo vysvětleno zvýšením krystalinity fotoaktivní vrstvy, čímž byl usnadněn přenos nosičů náboje a zvýšením kvality jejího kontaktu s Al vrstvou, pokud bylo žihání provedeno po jejím nanášení [5].

Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS:Au nanočástice (50 nm)/P₃HT:PCBM (150 nm)/Au nanovrstva/Ca (15 nm)/Al (100 nm) prezentovaný v [6] měl $J_{SC} = 11,2 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,64 \text{ V}$ a $FF = 0,67$ při $PCE = 4,8 \%$ za osvětlení solárním simulátorem simulujícím AM 1.5G světlo. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Na předem očištěné a pomocí UV záření a v ozonu připraveném ITO Skle byla nanesena rotačním nanášením vrstva PEDOT:PSS s Au nanočásticemi z 1 ml roztoku obsahujícího 1,5 hmotnostními % PEDOT:PSS a 2 mg Au nanočástic. Následně bylo ITO sklo žiháno při 150 °C 15 min, následně byla rotačním nanášením nanesena další přibližně 10 nm vrstva PEDOT:PSS. Vrstva P₃HT:PCBM (1:1) o tloušťce asi 150 nm byla nanesena z roztoku dichlorbenzenu o koncentraci 40 mg/ml. Následně byla nanesena vrstva Au tepelným napařováním za tlaku $5 \cdot 10^{-7}$ Torr a depoziční rychlosti 0,1 Å/s. Nakonec byly tepelným napařováním nanесeny vrstvy Ca a Al o tloušťkách 15 nm a 100 nm. Struktura tohoto solárního článku je vyobrazena na Obr. 7 [6].

Dále bylo zjištěno, že pokud by nebyly použity Au nanočástice, nebo by byla použita jiná tloušťka tepelně napařené Au vrstvy nebo by nebyla použita Au vrstva vůbec, *PCE* solárního článku by poklesla (4,02 % bez Au nanovrstvy a nanočástic) [6].

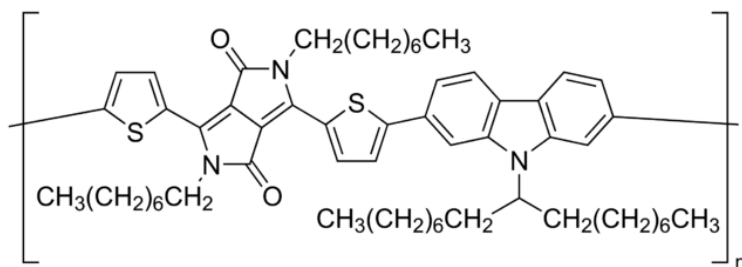
Zvýšení *PCE* při použití Au nanočástic a Au nanovrstev je zde vysvětleno vznikem povrchové plazmonové rezonance, která je rezonancí shluku elektronů vyvolaná absorpcí elektromagnetického záření kovovými nanočásticemi. Tato rezonance produkuje bipolární pole vně nanočástic a tak jsou posílena lokální elektrická pole, která zesilují absorpci záření. Vlnová délka maxima absorpce nanočástic závisí na jejich velikosti, tvaru a dielektrických vlastnostech kovu. Dále zde *PCE* zvyšoval rozptyl světla na nanočásticích, při kterém byla zvětšena dráha světla ve fotoaktivní vrstvě [6].



Obr. 7: Schématické znázornění solárního článku s dvojitou plasmonickou strukturou [6]

2.3.2 PCBTDP

PCBTDP neboli Poly[*N*-90-heptadecanyl-2,7carbazol-*alt*-3,6-bis(thiofen-5-yl)-2,5-dioctyl-2,5-dihydropyrrolo[3,4]pyrrole-1,4-dion], je polymerní materiál používaný ve fotovoltaice. PCBTDP dodávaný firmou Sigma Aldrich má početně průměrnou molární hmotnost M_n mezi 10 000 a 50 000 g/mol. PCBTDP má hladinu HOMO = 5,4 eV a LUMO = 3,9 eV. Jeho struktura je uvedena na Obr. 8 [7].



Obr. 8: Struktura PCBTDP [7]

Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/PCBTDP:PC₇₁BM(1:3)/Al prezentovaný v [8] měl $J_{SC} = 9,39 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,78 \text{ V}$, $FF = 0,45$ při $PCE = 3,28 \%$ za osvětlení solárním simulátorem s AM 1.5G filtrem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Na sklo pokryté ITO vrstvou byla nanесena vrstva PEDOT:PSS rotačním nanášením, substrát byl poté žhán při 140 °C 10 min na vzduchu. Potom byla rotačním nanášením z roztoku 1,2-dichlorbenzenu obsahujícího 0,8 hmotnostních % PCBTDP, 2,4 hmotnostních % PC₇₁BM a přídavek 1-chlornaftalenu nanесena aktivní vrstva o tloušťce přibližně 70 nm. Nakonec byla napařena hliníková katoda (asi 100 nm vrstva) vakuovým napařováním s tlakem menším, než $3 \cdot 10^{-6} \text{ Torr}$ [8].

Přídavek 1-chlornaftalenu zde zvyšoval PCE o 0,83 %. Zvýšením délky alkylových řetězců o dva uhlíky a nepoužitím 1-chlornaftalenu zde byla zvýšena PCE solárního článku na 3,64 % a pokud by byla navíc použita vrstva TiO_x mezi fotoaktivní vrstvou a hliníkovou katodou a směs 1,2-dichlorbenzenu a chlorbenzenu 3:1 jako rozpouštědlo při nanášení fotoaktivní vrstvy, bylo by dosaženo PCE 3,8 % [8].

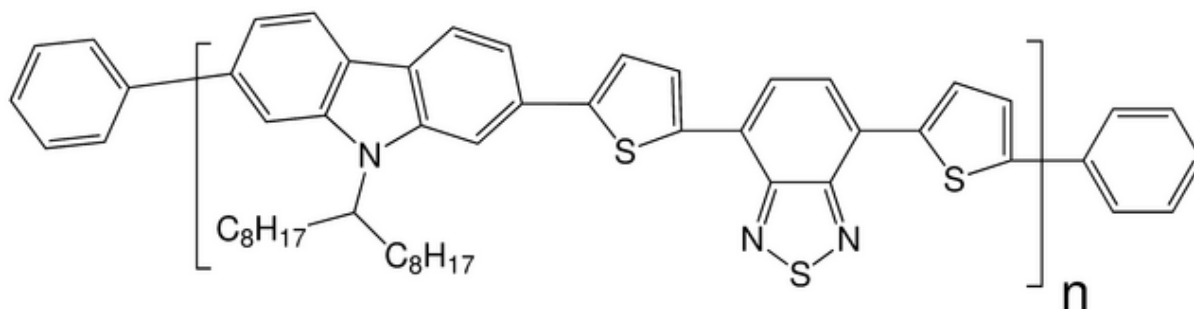
Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/PCBTDP:PC₇₁BM(1:3)-/LiF/Al prezentovaný v [9] měl $J_{SC} = 8,6 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,8 \text{ V}$, $FF = 0,47$ při $PCE = 3,2 \%$ za osvětlení simulovaným AM 1.5G světlem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku s aktivní plochou 1 cm^2 .

Na sklo pokryté ITO vrstvou byla 1 min rotačním nanášením při 7 000 ot/min nanесena vrstva PEDOT:PSS. Substrát byl poté 1 h žhán při 120 °C na vzduchu. Potom byla rotačním nanášením z roztoku 1,2-orthodichlorbenzenu nanесena přibližně 90 nm aktivní vrstva. Nakonec byla napařena vrstva LiF a hliníková katoda vakuovým napařováním [9].

PCE by zde snižovalo použití větší nebo menší tloušťky fotoaktivní vrstvy, jiného rozpouštědla nebo jiného poměru PCBTDP:PC₇₁BM [9].

2.3.3 PCDTBT

PCDTBT neboli Poly[*N*-9'-heptadecanyl-2,7-carbazol-*alt*-5,5'-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazol)], Poly[[9-(1-octylonyl)-9H-carbazole-2,7-diyl]-2,5-thiofendiyl-2,1,3-benzothiadiazol-4,7-diyl-2,5-thiofendiyl] je polymerní materiál používaný ve fotovoltaice. PCDTBT dodávaný firmou Sigma Aldrich má početně průměrnou molární hmotnost M_n mezi 20 000 a 100 000 g/mol. PCDTBT má hladinu HOMO = 5,5 eV a LUMO = 3,6 eV. Jeho teplota tání je 270 až 300 °C. Je používán k výrobě OFET tranzistorů a v organických solárních článcích. Struktura PCDTBT je uvedena na Obr. 9 [10].



Obr. 9: Struktura PCBTDT [10]

Organický solární článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:PC₇₁BM (1:3)/PF2/6-b-P3BMATCH/Al prezentovaný v [11] měl $J_{SC} = 10,6 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,89 \text{ V}$, $FF = 0,67$ při $PCE = 6,5 \%$ za osvětlení simulovaným AM 1.5G světlem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Na sklo pokryté ITO vrstvou byla nanесena rotačním nanášením přibližně 40 nm vrstva PEDOT:PSS. Následně byla rotačním nanášením z roztoku směsi 1,2-orthodichlorbenzenu a chlorbenzenu 3:1 nanесena aktivní vrstva PCDTBT:PC₇₁BM, z roztoku methanolu obsahujícího 0,02 % PF2/6-b-P3BMATCH nanесena vrstva CPE a nakonec nanесena hliníková katoda [11].

Bez vrstvy CPE by měl daný solární článek $PCE = 5,3 \%$. Vrstva CPE zde tvoří vhodnou náhradu vrstvy oxidů titanu [11].

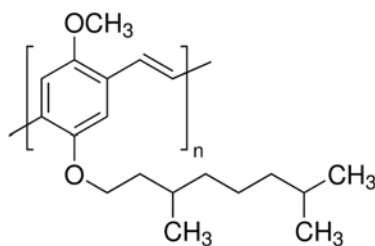
Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO/MoO₃:Al/PCDTBT:PC₇₁BM(1:4)/MoO₃/Al prezentovaný v [12] měl $J_{SC} = 5,64 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,88 \text{ V}$, $FF = 0,715$ při $PCE = 7,13 \%$ za osvětlení solárním simulátorem s xenonovou lampou, AM 1.5 filtrem a intenzitou osvětlení 49,8 mW/cm². Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Sklo pokryté ITO vrstvou bylo očištěno pomocí detergentu, dále čištěno působením ultrazvuku ve vodě, acetonu a izopropylalkoholu a následně žháno při 120 °C. Potom byla nanesena vakuovým napařováním přibližně 10 nm vrstva $\text{MoO}_3\text{:Al}$ v poměru 45:55 pod tlakem $4 \cdot 10^{-6}$ Torr. Dále byla nanesena asi 80 nm aktivní vrstva rotačním nanášením z roztoku dichlorbenzenu o koncentraci 4 mg/ml směsi PCDTBT:PC₇₁BM. Následně bylo provedeno vakuové napařování CS_2 a pod tlakem $4 \cdot 10^{-6}$ Torr vakuové napařování 6 nm vrstvy MoO_3 a 80 nm vrstvy Al [12].

Vrstva $\text{MoO}_3\text{:Al}$ zde sloužila jako katoda a vrstva Al jako anoda. Bez napařování CS_2 by měl daný fotovoltaiický článek menší *PCE*, pro snížení nebo zvýšení obsahu Al ve vrstvě $\text{MoO}_3\text{/Al}$ to platí také [12].

2.3.4 MDMO-PPV

MDMO-PPV neboli Poly[2-metoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-1,4-fenylenvinylem] je polymerní materiál používaný ve fotovoltaiice. MDMO-PPV dodávaný firmou Sigma Aldrich má početně průměrnou molární hmotnost M_n přibližně 23 000 g/mol. MDMO-PPV má hladinu HOMO = 5,4 eV a LUMO = 3,2 eV. Je rozpustný například v toluenu, xylenu, THF, chloroformu, chlorbenzenu a cyklohexanonu. Je používán k výrobě OLED diod, OFET tranzistorů a v organických solárních článcích. Struktura MDMO-PPV je uvedena na Obr. 10 [13].



Obr. 10: Struktura MDMO-PPV [13]

Organický fotovoltaiický článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/MDMO-PPV/PCBM:POPT(5:1)/Al prezentovaný v [14] měl $J_{SC} = 0,96 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,78 \text{ V}$, $FF = 0,5$ při $PCE = 0,5 \%$ za osvětlení solárním simulátorem s xenonovou lampou (150 W Oriel) a AM 1.5 filtrem intenzitou osvětlení 78 mW/cm^2 . Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaiického článku.

Na sklo pokryté ITO vrstvou byla nanesena vrstva PEDOT:PSS rotačním nanášením. Následně byla z roztoku xylenu obsahujícího MDMO-PPV, 4 mg/ml PCBM a 1 mg/ml POPT nanesena při 90 °C vrstva MDMO-PPV obsahující PCBM a při 20 °C vrstva PCBM obsahující POPT. Obě vrstvy měly každá tloušťku 60-100 nm. Použitý MDMO-PPV měl $M_n = 344\,000 \text{ g/mol}$ a $M_w = 1\,185\,000 \text{ g/mol}$ a jeho vrstva plochu 8 mm^2 [14].

Organický fotovoltaiický článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/MDMO-PPV:PCBM (1:4)/LiF/Al prezentovaný v [15] měl $J_{SC} = 5,25 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,82 \text{ V}$, $FF = 0,61$ při $PCE = 3,3 \%$ pod 80 mW/cm^2 AM1.5 osvětlením solárním simulátorem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaiického článku.

Na sklo pokryté ITO vrstvou byla rotačním nanášením nanesena vrstva PEDOT:PSS a následně fotoaktivní vrstva MDMO-PPV:PCBM o tloušťce přibližně 100 nm z roztoku

chlorbenzenu. Dále byla nanесena přibližně 3 Å tenká vrstva LiF tepelným napařováním při tlaku asi 10^{-4} Pa. Nakonec byla nanесena Al katoda [15].

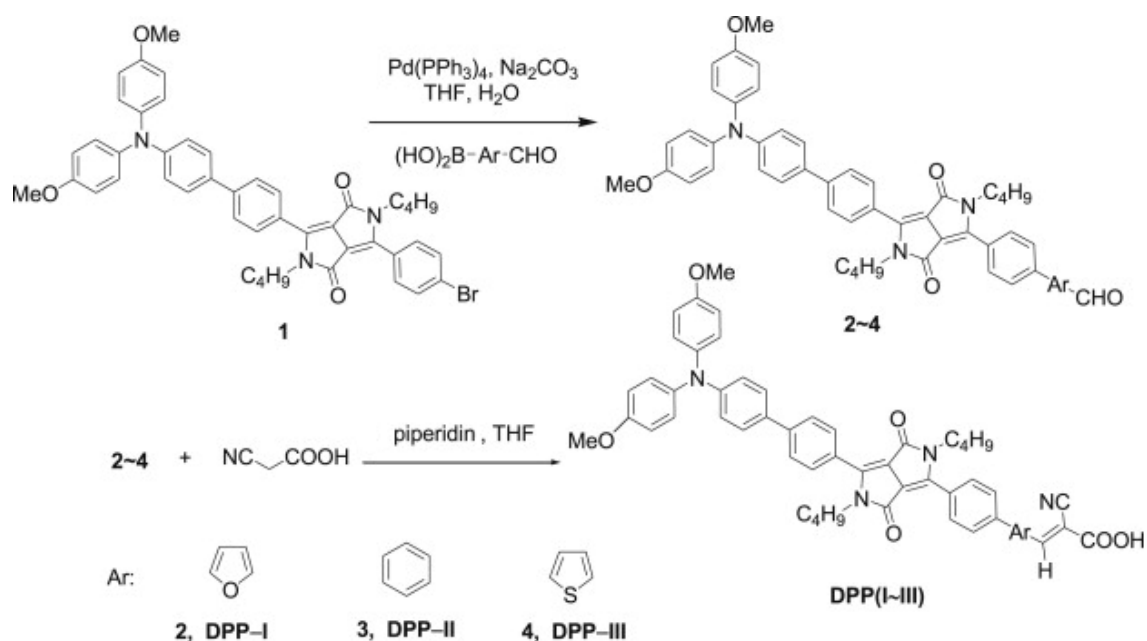
2.3.5 DPP

Materiály založené na DPP (diketopyrrolo pyrrole) se používají k výrobě organických solárních článků s barvivou zvýšenou citlivostí na sluneční světlo. Barviva mohou být založena například na furanu. Solární články s barvivou zvyšujícími citlivost na sluneční světlo založené na ruthenatých polypyridylových komplexech dosahují *PCE* až 12 % [16].

Organický fotovoltaický článek se strukturou FTO/TiO₂/DPP2/Pt prezentovaný v [16] měl $J_{SC} = 14,53 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,625 \text{ V}$, $FF = 0,66$ při *PCE* = 6,03 % a 100 mW/cm^2 AM 1.5 osvětlením solárním simulátorem s xenonovou lampou. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Na sklo pokryté vrstvou FTO vyčištěné ve vodě, acetonu, destilované vodě a ethanolu byla nanесena 16 μm vrstva TiO₂ sítotiskem. Následně bylo provedeno 30 min žihání při přibližně 450 °C. Výsledný film byl ponořen na jednu noc do 0,2 molárního vodného roztoku TiCl₄ a následně promyt vodou a ethanolem, což výrazně zvýšilo J_{SC} . Následně byl film znovu žihán při 450 °C 30 min a ochlazen na 80 °C, nanесen roztok barviva o koncentraci $3 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$ v dichlormethanu a vzorek nechán při pokojové teplotě 12 hodin. Následně byla nanесena Pt elektroda z kapky roztoku 2-propanolu obsahujícího 0,02 mol/l H₂PtCl₆ a provedeno 15 min žihání při 400 °C. Potom byla do Pt elektrody vyvrtána díra o průměru 0,8 mm. Následně bylo provedeno 10 min čištění v ethanolu za působení ultrazvuku. Nakonec byl otvor v elektrodě utěsněn pomocí gumy tvrdnoucí při UV záření za působení UV záření. Roztok elektrolytu obsahoval 0,6 mol/l jodidu 1-propyl-3-methylimidazolia, 0,1 mol/l LiI, 0,05 mol/l I₂ ve směsi acetonitrilu a methoxypropionitrilu (v objemovém poměru 7:3). Roztok DPP2 byl připraven ze směsi obsahující 0,2 g sloučeniny 1 (viz Obr. 11), 10 mg Pd(PPh₃)₄, 1,02 g Na₂CO₃ v roztoku 10 ml THF a 5 ml destilované vody, který byl zahříván 30 min na 45 °C. Potom byl pomalu přidáván roztok 0,07 g 4-formylphenyl borité kyseliny v 5 ml THF při dalším 12 h refluxním zahřívání. Potom byla směs extrahována v 30 ml CH₂Cl₂. Organická část byla následně přečištěna rotačním nanášením a sloupcovou chromatografií na silikagelu (CH₂Cl₂/ethyl acetát = 1/70 objem/objem) za vzniku červené pevné látky. Syntéza je vyobrazena na Obr. 11 [16].

Pokud by byl použit místo DPP2 materiál N-719 [17], *PCE* by byla zvýšena na 7,47 %. Pokud by byla použita místo DPP2 sloučenina 1 nebo 3 (viz Obr. 11) nebo jiná tloušťka vrstvy TiO₂ nebo pokud by byl použit jako elektrolyt bezrozpouštědlový iontový kapalný elektrolyt (se kterým byla dosažena životnost nad 2 000 hodin na slunečním svitu), z 1-butyl-3-methyl-imidazolia, jódu, benzimidazolu a guanidinthiokyanátu v poměru 120:5:2:10, *PCE* by tím byla snížena [16].



Obr. 11: Syntéza derivátů DPP [16]

2.3.6 PBDTTT-C

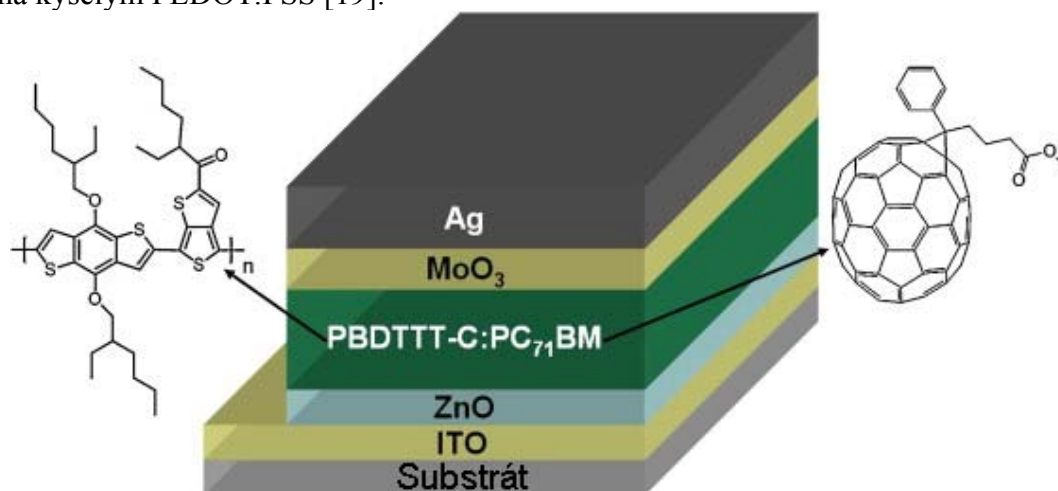
PBDTTT-C neboli Poly[(4,8-bis-(2-ethylhexyloxy)-benzo[1,2-b:4,5-b']dithiofen)-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b]thiofen))-2,6-diyl]) je polymerní materiál [18].

Organický fotovoltaický článek s invertovanou strukturou ITO/ZnO/PBDTTT-C:PC₇₁BM/MoO₃/Ag prezentovaný v [19] měl $J_{SC} = 13,31 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,7 \text{ V}$ a $FF = 0,64$ při $PCE = 6,64 \%$ za osvětlení solárním simulátorem s xenonovou lampou simulující AM 1.5G světlo. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Na sklo pokryté vrstvou ITO vyčištěné detergentem, vodou, acetonem, izopropanolem a osušeném proudem N₂ byla nanášena přibližně 30 nm vrstva ZnO pomocí sol-gel metody (gelovatění) a žihána 15 min na vzduchu při 150 °C. Fotoaktivní vrstva PBDTTT-C:PC₇₁BM (1:1,5) o tloušťce přibližně 70 nm byla nanášena rotačním nanášením z roztoku o-chlorbenzenu (s koncentrací složek fotoaktivní vrstvy 15 mg/cm³) s 3 % hmotnosti di-jodoktanu. Následně byly vrstvy přibližně 5 nm MoO₃ a přibližně 100 nm Ag anoda nanášeny tepelným napařováním. Osvětlená plocha fotoaktivní vrstvy zařízení byla 7,57 mm². Následně byl solární článek ozařován 4 min AM 1.5G osvětlením (89 mW/cm²) solárním simulátorem za přítomnosti UV záření k vyvolání fotožihacího efektu (photo-annealing), kdy je zvýšena vodivost ZnO vrstvy (jedna z možností, vysvětlení je fotochemická oxidace radikálů kyslíku fungujících jako pasti volných elektronů na kyslík a jeho vyloučení). Struktura tohoto organického solárního článku je na Obr. 12 [19].

Před čtyřminutovým osvětlením měl vzorek $PCE = 5,62 \%$. Po 212 min trvajícím osvětlení měl vzorek $PCE = 4,09 \%$, je to vysvětleno degradací fotoaktivní vrstvy (fotooxidací konjugovaného polymeru spojené s úbytkem jeho absorpce v absorpčním spektru) za působení UV záření (photo-bleaching). Bylo také zjištěno, že pokud by byl solární článek chráněn před UV zářením filtrem, degradace fotoaktivní vrstvy by byla pomalejší (U_{OC} by klesalo pomaleji), ale také fotožihací efekt (zvýšení PCE) by se projevoval mnohem pomaleji. Zapouzdření solárních článků zlepšuje jejich životnost (zpomaluje fotooxidaci) [19].

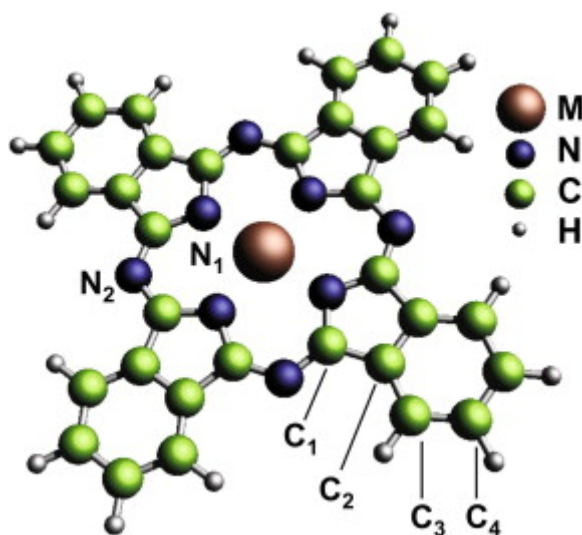
V porovnání s konvenční strukturou mají organické solární články s invertovanou strukturou používající ITO modifikované pro přenos elektronů jako katodu a Ag anodu velmi zvýšenou stabilitu, protože nepoužívají snadno oxidovatelné kovy, jako je Ca nebo Al a ITO vrstva není leptána kyselým PEDOT:PSS [19].



Obr. 12: Struktura zařízení a chemické struktury PBDTTT-C a PC₇₁BM [19]

2.3.7 Ftalocyaniny

Ftalocyaniny jsou komplexy ftalocyaninu s centrálním atomem. Ftalocyaniny přechodných kovů mají vynikající magnetické vlastnosti a jejich základní vzorec je uveden na Obr. 13. Mezi výhody ftalocyaninů patří jejich katalytická aktivita, světelná stabilita, tepelná stabilita (nevykazují rychlou degradaci do 400 °C) a odolnost vůči roztokům. Používají se jako pigmenty, dále v plynových senzorech, katalyzátorech pro palivové články, fotosenzitizérech, fotodynamické terapii rakoviny, magnetickém zobrazování tumorů, OLED, OFET, solárních článcích, zařízeních s jednou molekulou, spintronice a magnetických prepínačích [20].



Obr. 13: Struktura ftalocyaninů přechodných kovů: M je centrální ion přechodného kovu (například Mn, Fe, Co, Ni, Cu nebo Zn), který je obklopen čtyřmi pyrrolovými dusíky (N₁) a čtyřmi přemostěními azo-dusíkovými atomy (N₂). 24 atomů uhlíku ve vnějších benzenových kruzích je označeno C₂, C₃ a C₄, označení C₁, mají atomy uhlíku v pyrrolu [20].

2.3.7.1 AlPc

AlPc neboli ftalocyanin hliníku je dimerní sloučenina [21].

Organický fotovoltaiický článek se strukturou FTO/TiO₂/PCBM/AlPc dimer/PEDOT:PSS/Au prezentovaný v [21] měl po dvou měsících na vzduchu $J_{SC} = 0,78 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,43 \text{ V}$, $FF = 0,25$ při $PCE = 0,08 \%$ při 100 mW/cm^2 AM 1.5 osvětlení solárním simulátorem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaiického článku.

Na sklo pokryté vrstvou FTO byl aplikován roztok titanium propoxidu, 30 min žháno při 450 °C, následně nanese vrstva PCBM z roztoku chlorbenzenu (7,5 mg PCBM + 1 ml chlorbenzenu) rotačním nanášením při 1 000 ot/min, nanese aktivní vrstvy vakuovým napařováním, nanese vrstvy PEDOT:PSS rotačním nanášením při 2 000 ot/min a nanese Au elektroda při 140 °C 20 min tepelným napařováním v N₂ atmosféře [21].

Účinnost takového invertovaného solárního článku po dvou měsících byla mnohem větší, než u nově vyrobeného a také větší, než u solárního článku se strukturou ITO/PEDOT:PSS/AlPc dimer/C₆₀/Al [21].

2.3.7.2 ZnPc

ZnPc je ftalocyanin [22].

Organický fotovoltaiický článek se strukturou ITO/MeO-TPD (25 nm)/ZnPc:C₆₀ (2:1 ... 1:2 45 nm)/C₆₀ (30 nm)/BPhen (Bathofenanthrolin 6 nm [23])/Al (100 nm) prezentovaný v [22] měl $J_{SC} = 13,0 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,55 \text{ V}$, $FF = 0,52$ při $PCE = 3,7 \%$ za 100 mW/cm^2 osvětlení solárním simulátorem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaiického článku.

Na sklo s vrstvou ITO byly gradientovým vakuovým napařováním nanese příslušné látky. Účinnost by zde snižovalo přidání vrstvy ZnPc o tloušťce asi 15 nm mezi vrstvy MeO-TPD a ZnPc:PCBM, použití vrstev MeO-TPD a C₆₀ o tloušťkách 20 a 35 nm a jiný gradient vrstvy ZnPc:C₆₀, než 2:1 ... 1:2 (optimum pro přenos volných nosičů nábojů) [22].

2.3.7.3 PdPc

PdPc je ftalocyanin paladia [24].

Organický fotovoltaiický článek se strukturou ITO/PdPc (20 nm)/C₆₀ (30 nm)/PTCDI-C₆₀ (15 nm)/BCP (5 nm) [25]/Ag (100 nm) prezentovaný v [24] měl $J_{SC} = 9,7 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,55 \text{ V}$, $FF = 0,46$ při $PCE = 2,4 \%$ při 100 mW/cm^2 osvětlení AM 1.5G solárním simulátorem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaiického článku.

Na sklo s vrstvou ITO byly tepelně napařeny vrstvy článku. Vrstva PdPc:C₆₀ by mezi vrstvami PdPc a C₆₀ PCE solárního článku snížila, ale vrstva ZnPc:C₆₀ mezi vrstvami PdPc a C₆₀ by PCE zvýšila až na 3,7 % při tloušťce vrstvy 20 nm [24].

2.3.7.4 CuPc

CuPc je ftalocyanin mědi [26].

Organický fotovoltaiický článek se strukturou ITO (120 nm)/InCl₃ (1 nm)/CuPc (12 nm)/CuPc:C₆₀ (1:1) (20 nm)/C₆₀ (35 nm)/BPhen (8 nm)/Al(100 nm) prezentovaný v [26]

měl $J_{SC} = 7,52 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,46 \text{ V}$, $FF = 0,56$ při $PCE = 1,93 \%$ za 100 mW/cm^2 osvětlení AM1.5G solárním simulátorem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku s osvětlenou plochou fotoaktivní vrstvy $0,1 \text{ cm}^2$.

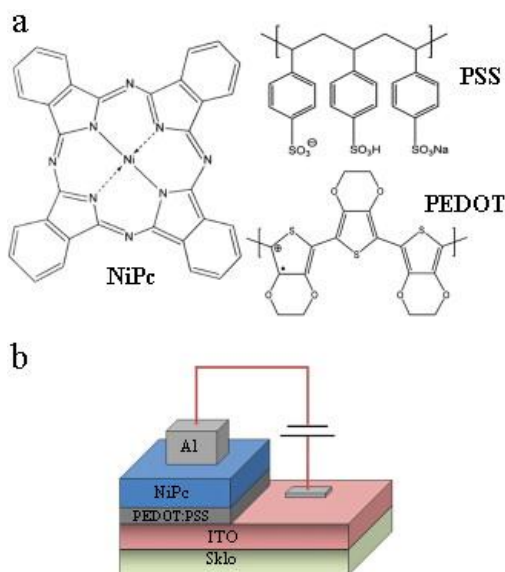
Na očištěné a v ozonu UV zářením upravené sklo s vrstvou ITO byly tepelně napařeny vrstvy článku. Vzorky s 1 nm vrstvou InCl_3 měly větší PCE , než s 0 nm , $0,5 \text{ nm}$ a 2 nm vrstvami. Použití mezivrstvy zlepšovalo děrovou vodivost ITO vrstvy a absorpci fotoaktivní vrstvy díky lepšímu uspořádání molekul a následně zlepšovalo PCE . Vrstva CuPc:C_{60} (1:1) také zlepšovala PCE solárního článku [26].

2.3.7.5 NiPc

NiPc je ftalocyanin niklu, jeho struktura je vyobrazena na Obr. 14 [27].

Organický fotovoltaický článek se strukturou ITO (120 nm)/PEDOT:PSS (40 nm)/CuPc (200 nm)/Al(150 nm) (viz Obr. 14) prezentovaný v [27] měl $J_{SC} = 0,07 \text{ mA/cm}^2$, $U_{OC} = 0,55 \text{ V}$, $FF = 0,265$ při $PCE = 0,0093 \%$ při 100 mW/cm^2 osvětlení solárním simulátorem. Dále je popsána příprava tohoto organického fotovoltaického článku.

Skla s vrstvou ITO bylo vyčištěno za použití ultrazvuku 10 min v propanolu, acetonu, deionizované vodě a izopropyl alkoholu, následovalo vysušení proudem plynného N_2 . Následně byla nanášena vrstva PEDOT:PSS rotačním nanášením při $3\,000 \text{ ot/min}$, provedeno 30 min sušení při $110 \text{ }^\circ\text{C}$, tepelné napařování vrstvy CuPc při tlaku 10^{-6} Torr rychlostí 1 Å/s a tepelné napařování Al katody za použití stínící masky [27].



Obr. 14: Struktura materiálů NiPc a PEDOT:PSS (a) a struktura prezentovaného solárního článku s NiPc (b) [27]

2.3.7.6 Donory elektronů

Ve výše zmíněných studiích sloužily materiály P_3HT , PCBTDP, PCDTBT, MDMO-PPV, PBDTTT-C, AlPc, ZnPc, PdPc, CuPc a NiPc jako donory elektronů s děrovou vodivostí, zatímco materiály PCBM, PC_{71}BM a C_{60} jako akceptory elektronů s elektronovou vodivostí.

2.4 Účinnost a cena fotovoltaických článků s organickými polovodiči

Maximální dosažené hodnoty *PCE* pro různé materiály jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 1*), nejvyšší *PCE* zde má materiál N719, *PCE* nad 5 % byla dosažena i u materiálů PCBTDT, PBDTTT-C, DPP2 a P₃HT.

Tabulka 1: Maximální dosažené PCE v uvedených výzkumech pro různé donorní materiály

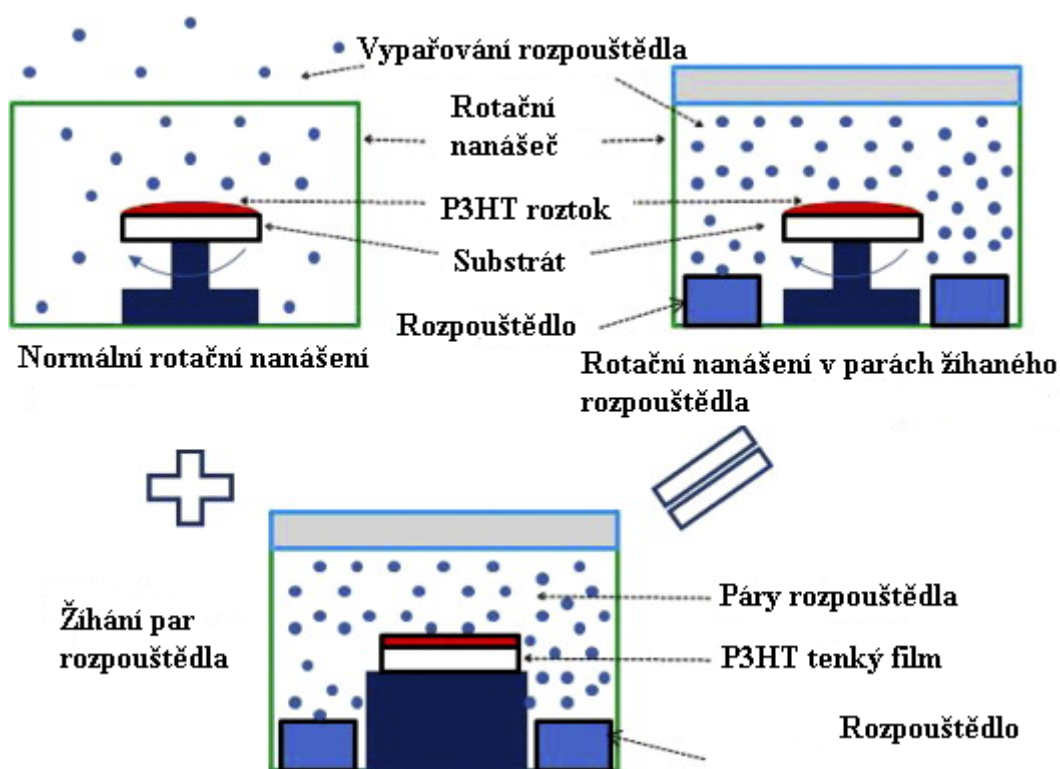
Materiál	<i>PCE</i> (%)	Materiál	<i>PCE</i> (%)
N-719	7,47	ZnPc	3,7
PCDTBT	7,13	PdPc	2,4
PBDTTT-C	6,64	CuPc	1,93
DPP2	6,03	AlPc	0,08
P ₃ HT	5,16	NiPc	0,0093
MDMO-PPV	3,3	-	-

Výhodou organických polovodičů oproti anorganickým je, že jsou z nich vyráběna zařízení jinými technikami zahrnujícími tisk a různé druhy nanášení. Vzhledem k tomu, že jsou polymery obvykle zpracovávány v roztoku, jsou tiskové techniky přirozenou volbou pro použití roztoku strukturovaným způsobem na flexibilní podklad. Použití tiskových technik je velmi levné a produktivní. Organické polovodiče jsou perspektivní z hlediska nových aplikací a aplikací ve spotřební elektronice [1].

2.5 Metody přípravy tenkých vrstev

2.5.1 Rotační nanášení

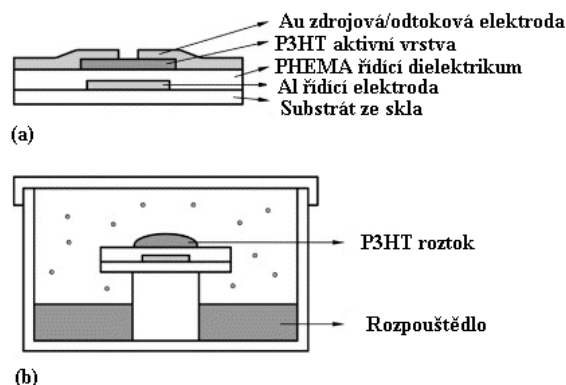
Rotační nanášení (spin coating) je metoda přípravy tenkých vrstev, fungující na principu vypařování rozpouštědla z roztoku, který byl nanesen na substrát za současného otáčení substrátu. Tato metoda vykazuje oproti žíhání par rozpouštědla (solvent vapor annealingu) nižší krystalinitu připravovaných polymerních vrstev a s tím související několikanásobně nižší pohyblivost volných nosičů nábojů, ale trvá mnohem menší dobu, než zahřívání par rozpouštědla a je pro průmysl levnější. Možným řešením problému nízké krystalinity je rotační nanášení v parách žíhaného rozpouštědla (solvent vapor assisted spin coating), které je kombinací klasického rotačního nanášení a zahřívání par rozpouštědla, je podobně časově a finančně nenáročné jako klasické rotační nanášení a vrstvy jím připravené mají v porovnání se zahříváním par rozpouštědla podobnou krystalinitu a o něco vyšší pohyblivost nosičů nábojů. Na *Obr. 15* je znázorněno schéma rotačního nanášení, zahřívání par rozpouštědla a rotačního nanášení v parách žíhaného rozpouštědla [28].



Obr. 15: Schéma rotačního nanášení (vlevo nahoře), zahřívání par rozpouštědla (dole) a rotačního nanášení v parách žíhaného rozpouštědla (vpravo nahoře) [28]

2.5.2 Nanášení kapek

Nanášení kapek (drop casting) je metoda přípravy tenkých vrstev na principu vypařování rozpouštědla z kapky roztoku nanesené na substrát. Možným řešením problému nízké krystalinity tenkých vrstev vyrobených nanášením kapek je nanášení kapek v parách zahříváného rozpouštědla (solvent vapor assisted drop casting), které je kombinací normálního nanášení kapek a zahřívání par rozpouštědla, je podobně časově nenáročné a jednoduché, jako normální nanášení kapek a vrstvy jím připravené mají v porovnání se standardním nanášením kapek mnohem vyšší krystalinitu a pohyblivost volných nosičů nábojů. Na Obr. 16 je znázorněno schéma nanášení kapek v parách zahříváného rozpouštědla [29].

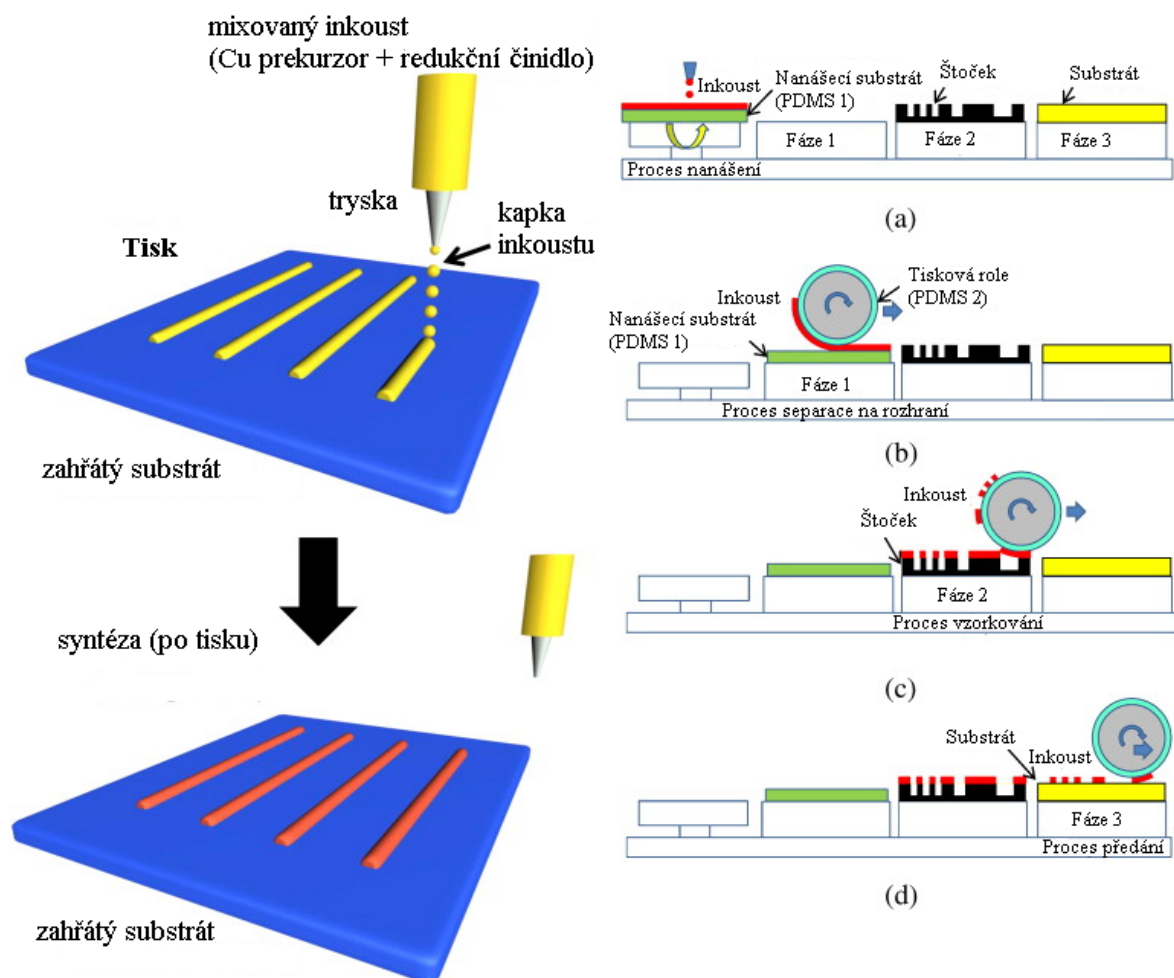


Obr. 16: Schéma nanášení kapek v parách zahříváného rozpouštědla a vzorku P₃HT [29]

2.5.3 Materiálový tisk

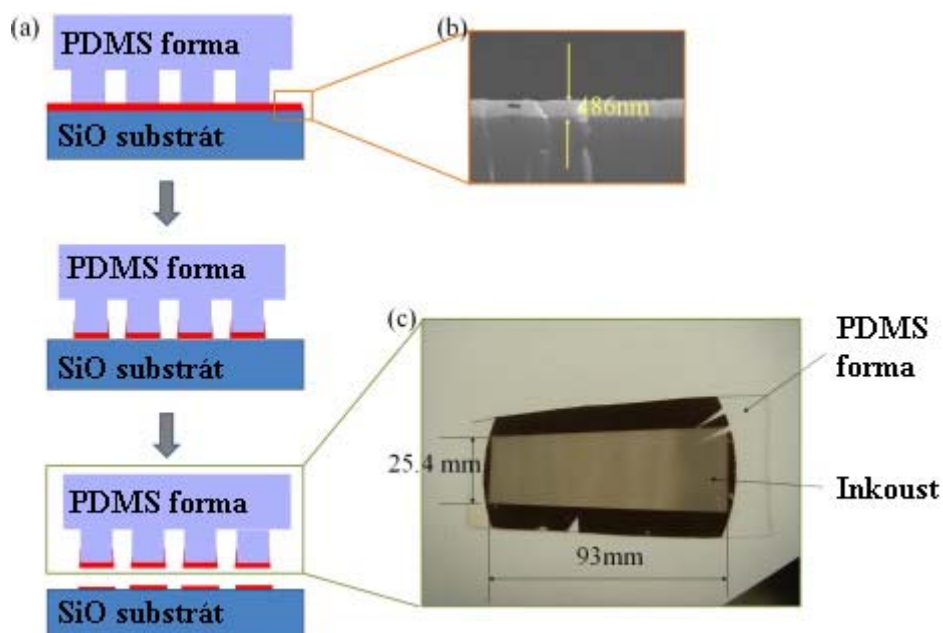
Často používanou metodou materiálového tisku (material printing) je inkoustový tisk, který funguje na principu vstřikování kapek roztoku (inkoustu) z tiskových trysek. Konvenční inkoustový tisk nemusí být vždy schopen tisknout požadovaný materiál a například u kovů bývají používány koloidní inkousty, které jsou drahé a často ucpávají trysky tiskárny. Řešením těchto problémů je reaktivní inkoustový tisk (reactive inkjet printing), což je inkoustový tisk, při kterém je jako inkoust použita směs prekurzoru tištěné látky a reakčního činidla připravená těsně před tiskem, tištěná látka vzniká přitom až na substrátu chemickou reakcí. Tento druh tisku je vhodný třeba na tisk Cu kontaktů. Proces reaktivního inkoustového tisku je znázorněn na Obr. 17 vlevo [30].

Další používanou metodou materiálového tisku je ofsetový tisk (offset printing), který využívá proces separace na rozhraní. Proces ofsetového tisku probíhá v těchto krocích: nanesení vrstvy inkoustu na rovnou plochu, přenos inkoustu na roli, přejetí role po vzoru a přejetí role s negativem vzoru po substrátu určeného na potisk (viz Obr. 17 vpravo). U ofsetového tisku lze použít například inkoust s Ag nanočásticemi, nevýhodou této metody je její nepoužitelnost pro tisk vrstev tenčích, než 1 nm [31].



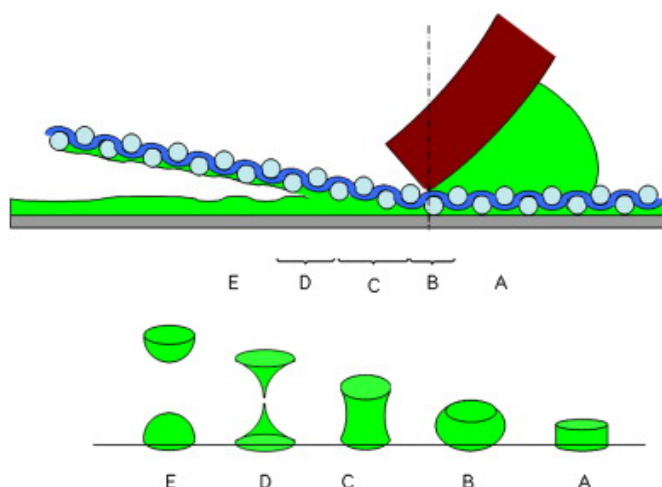
Obr. 17: Schematické znázornění procesu reaktivního inkoustového tisku [30] (vlevo) a procesu válcového ofsetového tisku užívající separaci na rozhraní skládajícího se ze čtyř procesů: (a) procesu nanášení, (b) procesu separace na rozhraní, (c) procesu vzorkování, (d) procesu předání [31] (vpravo)

Mezi metody materiálového tisku patří také flexotisk (flexo printing), fungující na principu nanášení inkoustu na rotující válec s tiskovým vzorem a následného tisku daného inkoustem namočeného vzoru na substrát. Schématické znázornění nanášení inkoustu u flexotisku je na Obr. 18 [32].



Obr. 18: Schématické znázornění namáčení tiskového vzoru na flexotiskovém válci (a), tloušťka vrstvy inkoustu (b) a obrázek flexotiskové formy (c) [32]

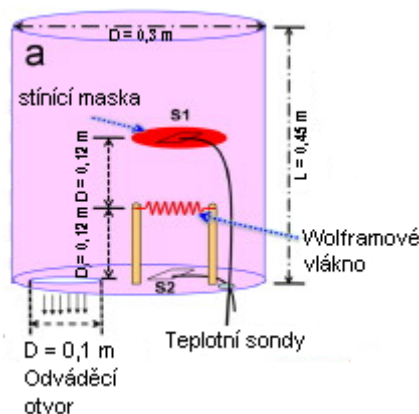
K materiálovému tisku lze použít i sítotisk (screen printing). Lze jej použít například při výrobě barevných filtrů k LCD displejům. Sítotisk má oproti klasickému inkoustovému tisku výhodu v oblasti nákladů (sítotiskové zařízení je levnější a jednodušší, než inkoustová tiskárna.), jeho rychlost nijak nezaostává za inkoustovým tiskem. Sítotiskem lze dosáhnout tloušťky vrstvy okolo 2-3 μm a rozlišení 130 μm . Metoda sítotisku spočívá v natlačení inkoustu na síto se vzorem pomocí stěrky a následném odejmutí síta z tištěného povrchu (viz Obr. 19) [33].



Obr. 19: Proces sítotisku [33]

2.5.4 Napařování

Tepelné napařování (thermal evaporation) je metoda přípravy tenkých vrstev využívající procesu vypařování látky za zvýšené teploty a následné kondenzace látky za nižší teploty. V praxi se k definici napařované plochy používají stínící masky a snížený tlak (vakuum). Tato metoda se používá například k napařování Al kontaktů ke vzorkům organických polovodičů. Bylo zjištěno, že na kvalitu napařeného kontaktu má značný vliv teplota napařování, protože se zvyšující se teplotou napařování se zlepšuje struktura fotoaktivní vrstvy a nedochází tolik k difuzi Al do ní, proto v ní nevznikne tolik elektronových pastí a také dochází k lepšímu navázání Al na fotoaktivní vrstvu (vznik C-Al a C-O-Al) vazeb. Na Obr. 20 je znázorněna aparatura pro tepelné napařování, ve které byly ve studii [34] vyrobeny Al kontakty vzorků organických solárních článků se strukturou FTO/Cr₂O₃/P₃HT:PCBM/Al v různých místech napařovací komory (vrstva P₃HT:PCBM zde byla nanášena rotačním nanášením). Bylo zjištěno, že vzorek S1 umístěný nahoře měl největší *PCE* ze všech tří případů, vzorek S2 umístěný dole měl menší *PCE*, než vzorek S3 umístěný 2 mm nad povrchem. Při tepelném napařování byla měřena pomocí sond teplota v různých místech komory a tak bylo zjištěno, že se stoupající teplotou tepelného napařování Al kontaktu na solární článek roste i jeho *PCE* solárního článku a klesá jeho sériový odpor. Vakuové napařování je tepelné napařování za velmi nízkého tlaku [35].



Obr. 20: Schéma tepelného napařování [34]

3 Experimentální část

3.1 Příprava tenkých vrstev

3.1.1 Předtisková příprava

K přípravě vzorků organických polovodičů se strukturou ITO/PEDOT/PdPc:PCBM/Al a vzorků se strukturou ITO/PdPc:PCBM/Al byly použity substráty s natištěnými transparentními ITO kontakty od firmy Ossila [36]. Pro porovnání byly použity nové podložky a podložky již dříve použité (recyklované). Před tiskem byly substráty důkladně očištěny v roztoku tenzidu Neodischer, Mili-Q vodě, acetonu a nakonec v chloroformu.

3.1.2 Tisk vrstev

U vzorků 1 a 2 byla dvěma tryskami natištěna vrstva PEDOT:PSS z 0,25 ml roztoku od firmy Ossila [37], 1 ml isopropanolu, 0,5 ml cyklohexanonu a 0,25 ml H₂O.

Potom byla natištěna aktivní vrstva z roztoku obsahujícím 9 mg PdPc a 5 mg PCBM nebo jejich poloviční množství v 0,5 ml chlorbenzenu a 1,5 ml cyklohexanonu za použití 12 nebo 16 trysek.

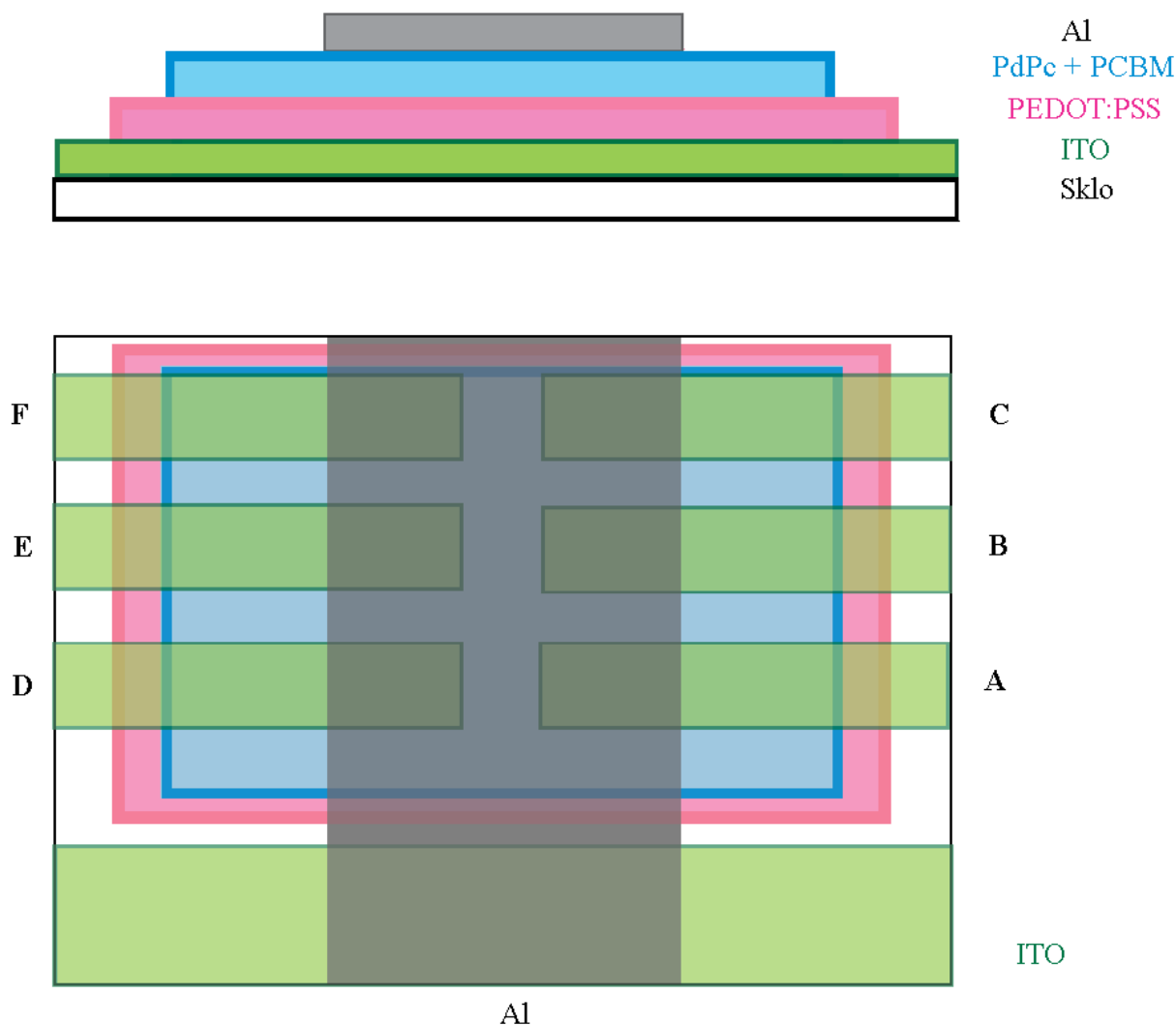
K tisku PEDOT:PSS i aktivní vrstvy byla použita tiskárna Fujifilm Dimatix s 16ti tryskami. Teplota substrátu při tisku byla 45 °C. Tloušťka aktivních vrstev byla u vzorků 1, 2, 4 a 5 $80,8 \pm 0,8$ nm a u vzorku 3 $40,4 \pm 0,8$ nm, plocha horní elektrody $0,48 \text{ cm}^2$ a plocha aktivní vrstvy pod horní elektrodou $0,05 \text{ cm}^2$. Podmínky přípravy jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2).

Tabulka 2: Podmínky přípravy vzorků PdPc/PCBM

pořadové číslo	podložka	PEDOT	Tištěná vrstva roztoku PEDOT:PSS	PdPc/PCBM	Tištěná vrstva roztoku PdPc/PCBM
1	nové sklo	PEDOT	20 μm	9 mg PdPc + 5 mg PCBM	20 μm 12 trysek
2	recyklované sklo	PEDOT	20 μm	9 mg PdPc + 5 mg PCBM	20 μm 12 trysek
3	recyklované sklo	-	-	4,5 mg PdPc + 2,5 mg PCBM	20 μm 12 trysek
4	nové sklo	-	-	9 mg PdPc + 5 mg PCBM	20 μm 12 trysek
5	recyklované sklo	-	-	9 mg PdPc + 5 mg PCBM	20 μm 16 trysek

3.1.3 Kontaktování a zapouzdření

Následně bylo provedeno vakuové napařování horních hliníkových katod, zapouzdření pomocí E131 Encapsulation Epoxy, laminačního skla a nakontaktování vzorků pomocí kovových kontaktovacích nožek od firmy Ossila [38]. Vrstva ITO ve vyrobených vzorcích sloužila jako anoda a vrstva hliníku jako katoda. Struktura vyrobených vzorků je uvedena na Obr. 21.



Obr. 21: Struktura připravených vzorků ITO/PEDOT/PdPc:PCBM/Al, nahoře je uvedena posloupnost jednotlivých vrstev, zatímco dole jejich plochy na vzorku, kontakty (tvořící samostatné vzorky značené číslem vzorku a písmenem kontaktu) jsou označeny písmeny A-F.

3.2 Experimentální metody

3.2.1 Optická mikroskopie

Byly pořízeny mikrofotografie a profilometrem změřena tloušťka aktivních vrstev dalších vzorků se strukturou ITO/PEDOT/PdPc:PCBM/Al a vzorků ITO/PdPc:PCBM/Al, připravených stejným postupem, jako pětice vzorků pro charakterizaci elektrických a dielektrických

vlastností specifikovaná v tabulce (Tabulka 2). Mikrofotografie byly pořízeny pomocí Mikroskopu Nikon Eclipse TE200 s 4násobným zvětšením a osvětlením shora, digitálního fotoaparátu Nikon D5000 (viz Obr. 22) a programu Camera Control Pro.



Obr. 22: Mikroskop Nikon Eclipse200 (vlevo) [39] a digitální fotoaparát Nikon D 5 000 (vpravo) [40]

3.2.2 Sluneční simulátor v kombinaci se stejnosměrným a střídavým měřením

Měření volt-ampérových charakteristik (VA) a impedančních spekter (IS) za světla byla provedena pod solárním simulátorem LOT-ORIEL LS0916 s xenonovou výbojkou při osvětlení $1\,000\text{ W/m}^2$. (viz Obr. 23)



Obr. 23: Solárním simulátor LOT-ORIEL LS0916 [41]

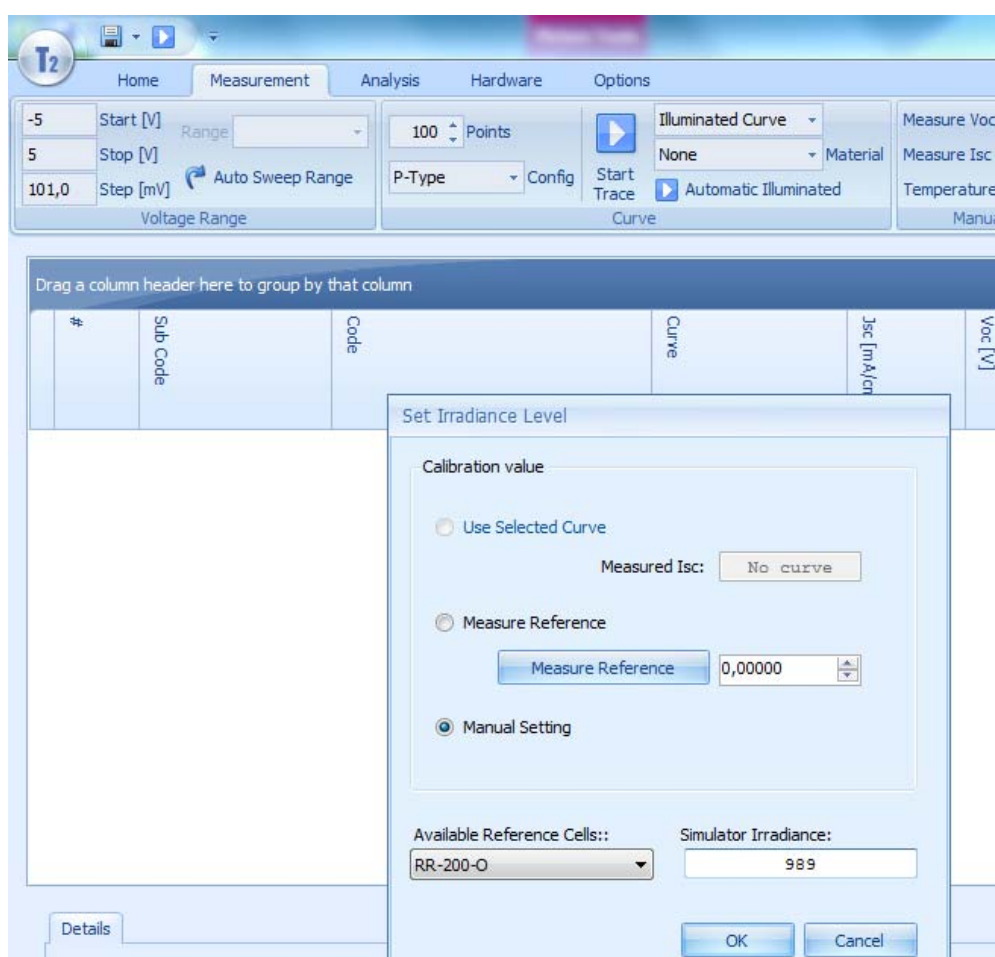
3.2.3 Volt-ampérové charakteristiky

Měření VA charakteristik bylo provedeno na elektrometru Keithley 6517B (viz Obr. 24) s pomocí programu *Tracer2*, jehož ovládací panel je na Obr. 25. Byly proměřeny vzestupné a sestupné VA charakteristiky vzorků 1-5 za tmy a za světla. Pro vzestupná měření byl zvolen rozsah -5 V až 5 V , pro sestupná měření 5 V až -5 V , při 100 krocích.



Obr. 24: Elektrometr Keithley 6517B [42]

V ovládacím panelu (viz Obr. 25) programu bylo na kartě „Measurement“ v „Start [V]“ nastaveno startovací napětí, v „Stop [V]“ konečné napětí a v „Points“ počet kroků měření. V „Set Irradiance“, zvolením „Manual Setting“ a nastavením hodnoty 989 v „Simulator Irradiance“ bylo nastaveno osvětlení 1000 W/m^2 pro měření za světla pod solárním simulátorem. V „Range“ lze zvolit maximální měřený proud. Měření bylo spuštěno tlačítkem „Start Trace“. Naměřená data byla uložena zvolením „Export Selected Curves“ v kontextovém menu zvolených souborů dat a zvolením „Curves without parameters“ a zpracována v Microsoft Excelu.



Obr. 25: Ovládací panel programu Tracer2

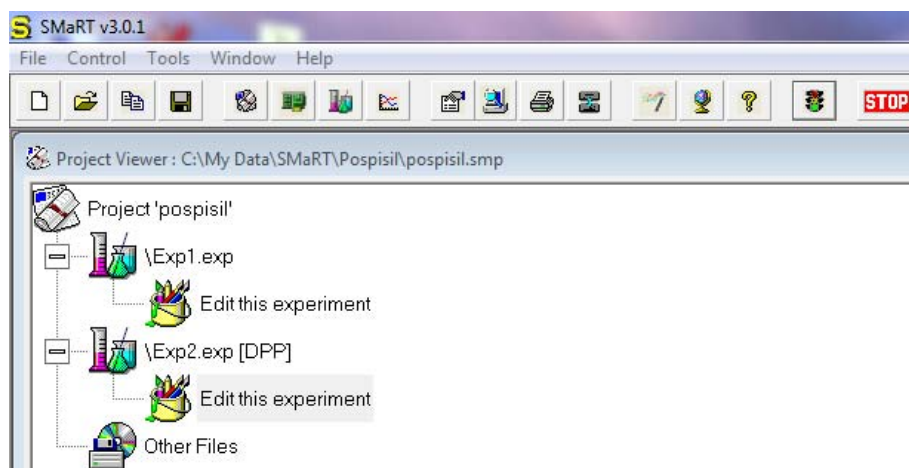
3.2.4 Impedanční spektra

Měření IS pětice vzorků bylo provedeno na impedančním analyzátoru Solartron Si 1260 (viz Obr. 26 vlevo) s pomocným modulem Solartron Si 1296 Dielectric Interface (viz Obr. 26 vpravo). K analýze byl použit program SMART v3.0.1 (viz Obr. 27). Byly proměřeny IS vzorků 1-5 za tmy a za světla. Počáteční a koncová frekvence byly 20 MHz a 0,05 Hz, počet měření na dekádu frekvence byl 10, amplituda střídavého napětí 10 mV a stejnosměrné předpětí 0 V.



Obr. 26: Impedanční analyzátor Solartron Si 1260 (vlevo) [43], Modul Solartron Si 1296 Dielectric Interface (vpravo) [44]

Před začátkem měření byla v programu pomocí druhé ikony zleva a vytvořena nová dávka by byla vytvořena první ikonou zleva, resp. vybrána dříve vytvořená dávka. Zvolením položek „Edit this experiment“ a „Sweep Frequency“ bylo vyvoláno nastavení počáteční a koncové frekvence a počtu měření na dekádu frekvence. Střídavé napětí bylo nastaveno v „Set AC Level“ a stejnosměrné napětí v „Set DC Level“. Měření bylo spuštěno ikonou semaforu, zvolením „Exp2.exp [DPP]“ a odmítnutím konfigurace grafu. Na naměřené soubory bylo poklepáno, zvoleno „Convert“ a výsledné soubory byly zpracovány v Microsoft Excelu.



Obr. 27: Ovládací panel programu SMART

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

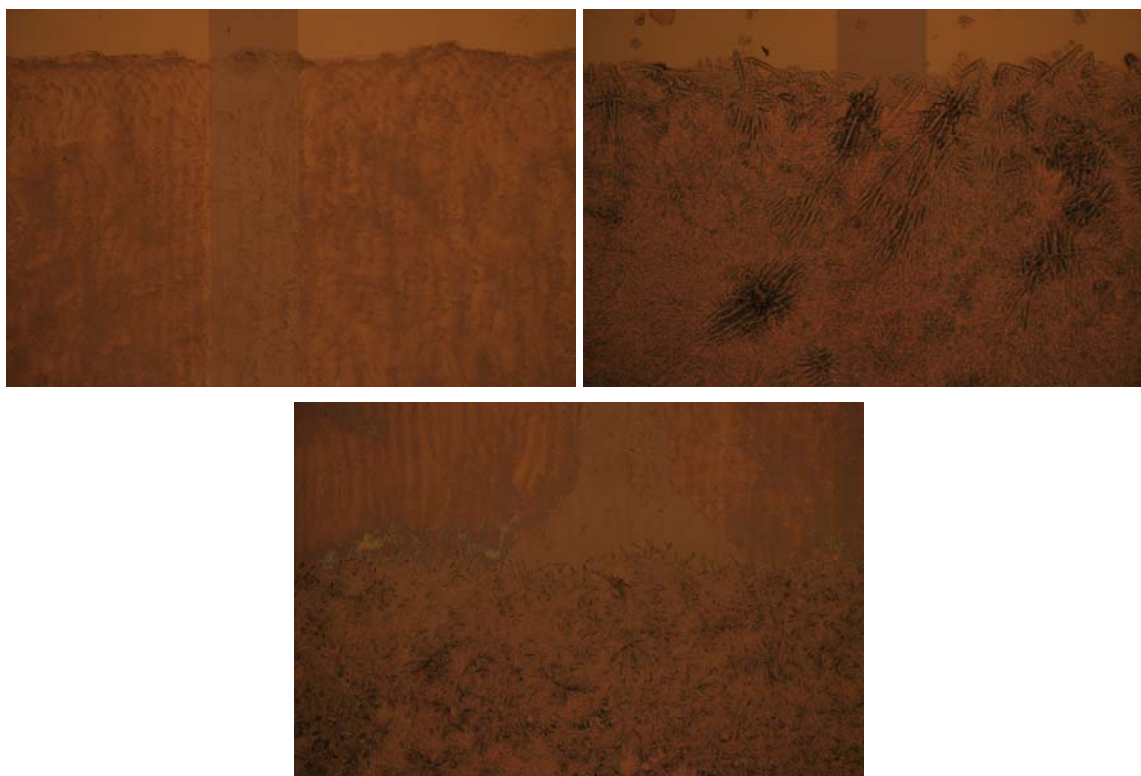
Vyrobené vzorky specifikované v tabulce (*Tabulka 2*) byly charakterizovány z hlediska optických, elektrických a dielektrických vlastností. Následují výsledky optické mikroskopie, dále jsou uvedeny výsledky měření VA charakteristik a impedančních spekter vzorku 4C, který vykazoval fotovodivost a souhrnné výsledky měření z hlediska fotovodivosti.

4.1 Optická mikroskopie

Na *Obr. 28* jsou mikrofotografie struktur vzorků s aktivními organickými polovodiči: ITO/PEDOT:PSS (vlevo nahoře), ITO/PdPc:PCBM (vpravo nahoře) a ITO/PEDOT:PSS/PdPc:PCBM (dole).

Na *Obr. 28* vlevo nahoře je rýhovaná struktura PEDOT:PSS na skle s ITO proužkem. Krystalická struktura aktivní vrstvy PdPc:PCBM na skle s ITO proužkem na *Obr. 28* vpravo nahoře je vysoce uspořádaná, krystaly mají tmavé okraje a nad ní je sklo s ITO kontaktem. Struktura aktivní vrstvy PdPc:PCBM na *Obr. 28* dole je krystalická a má jinak uspořádané krystaly, Nad aktivní vrstvou je vrstva PEDOT:PSS, na které jsou vidět tmavé a světlé rýhy.

Na strukturách PdPc:PCBM na *Obr. 28* vlevo nahoře a dole jsou zřejmé fázové separace objemově heterogenní struktury směsi PdPc/PCBM a nejsou zřejmé žádné nečistoty. Rozdíl mezi strukturami aktivní vrstvy může být způsoben rozdílem přilnavostí PdPc k PEDOT:PSS a skleněné podložce, nad aktivní vrstvou je holá skleněná podložka s ITO kontaktem, na které jsou opět zřejmé krystaly PdPc. Světlé rýhy ve vrstvě PEDOT:PSS vzniklé při tisku znamenají tenčí vrstvu.



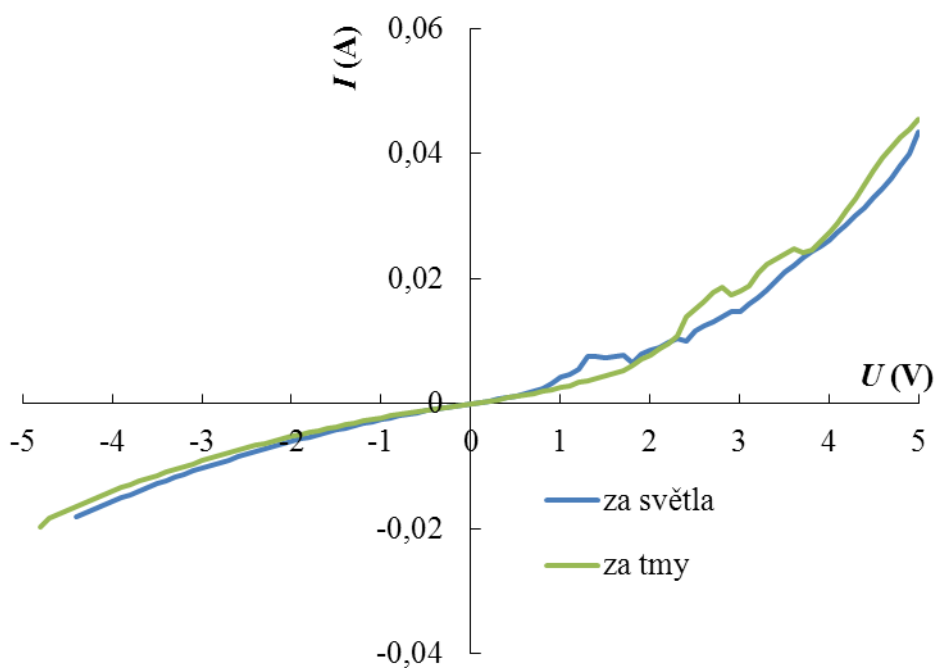
Obr. 28: Mikrofotografie struktur vzorků organických polovodičů ITO/PEDOT:PSS (vlevo nahoře), ITO/PdPc:PCBM (vpravo nahoře) a ITO/PEDOT:PSS/PdPc:PCBM (dole)

4.2 Vyhodnocení VA charakteristik vzorku 4C

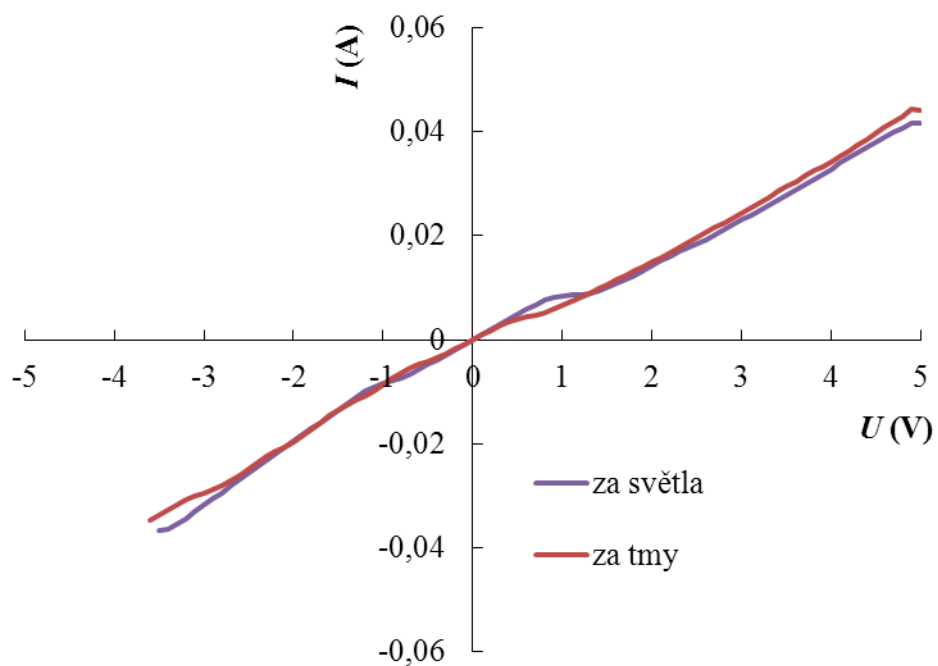
Na *Obr. 29* a *Obr. 30* jsou uvedeny VA charakteristiky sendvičové struktury vzorku 4C (kontaktu C vzorku 4) se strukturou ITO/PEDOT/PdPc:PCBM/Al. Jsou uvedeny závislosti pro neosvětlený a osvětlený vzorek ($1\,000\text{ W/m}^2$).

Z *Obr. 29* a *Obr. 30* je zřejmé, že pro záporná napětí je proud za světla trochu vyšší, než za tmy, zatímco pro kladná napětí nad 2 V trochu nižší. Vzestupné VA charakteristiky jsou zde superlineární (díky proudu omezeném prostorovým nábojem - SCLC), zatímco sestupné jsou lineární. Závislosti mají minimum pro napětí 0 V, z toho vyplývá, že vzorek nevykazuje fotovoltaiický jev. Pro záporná elektrická napětí proud je při osvětlení větší, pro kladná elektrická napětí menší, z toho vyplývá, že kontakt vykazuje pro záporná napětí fotovodivost a pro kladná napětí fotobariéru.

Fotovodivost zde nebyla výrazná. Aby jev byl lépe pozorovatelný, byly zkonstruovány závislosti elektrického výkonu ($P = U \cdot I$) na elektrickém napětí vzorku 4C na *Obr. 31* a *Obr. 32*.

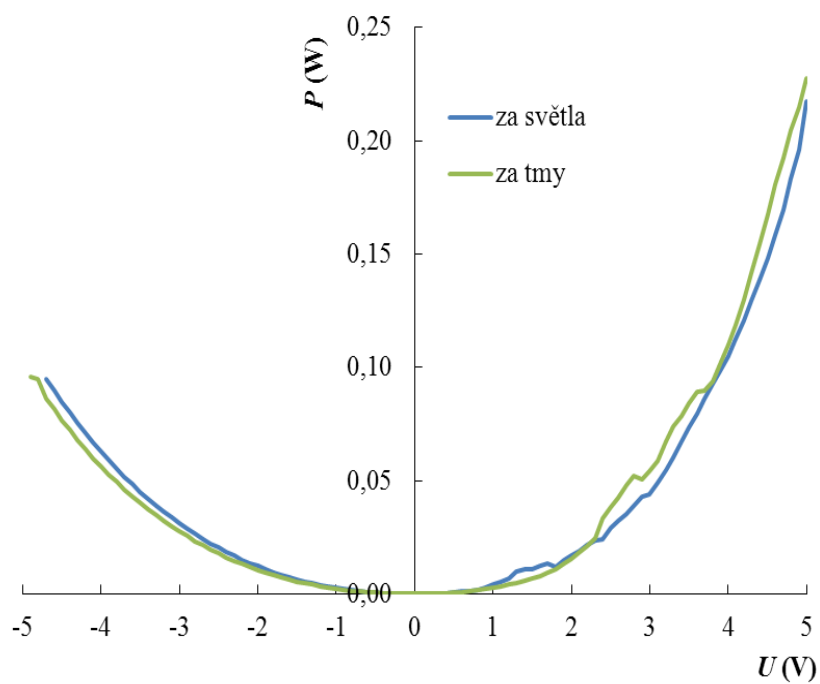


Obr. 29: Vzestupné VA charakteristiky vzorku 4C

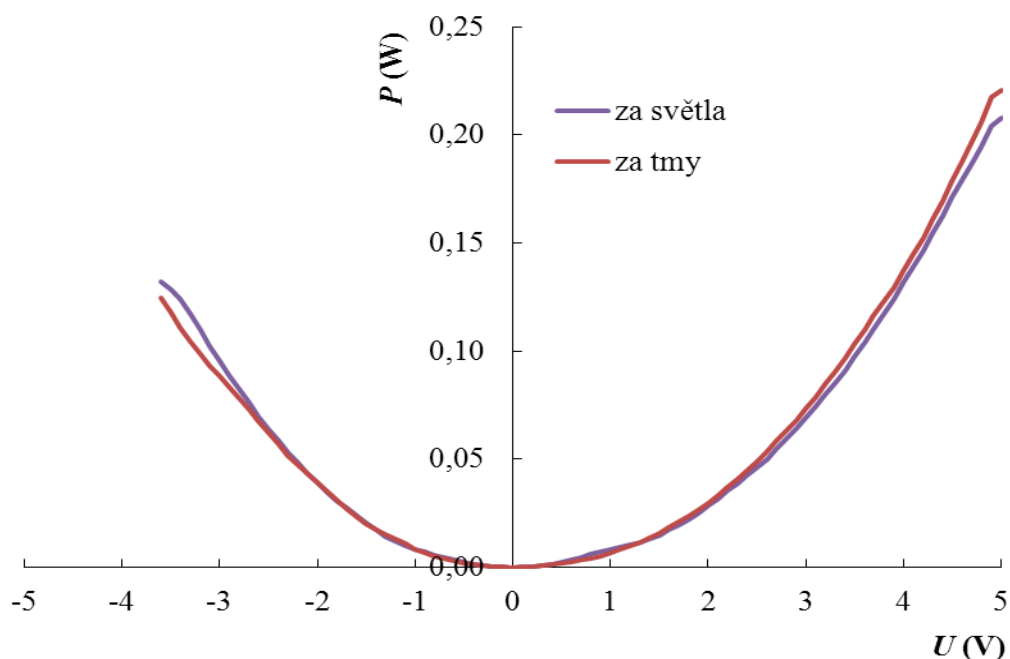


Obr. 30: Sestupné VA charakteristiky vzorku 4C

V závislostech výkonu na napětí na Obr. 31 a Obr. 32 je vidět, že pro záporná napětí pod -2 V je výkon za světla trochu vyšší, než za tmy, zatímco pro kladná napětí nad 2 V trochu nižší. Je zde tedy opět zřejmá fotobariéra v kladných napětích a fotovodivost v záporných napětích.

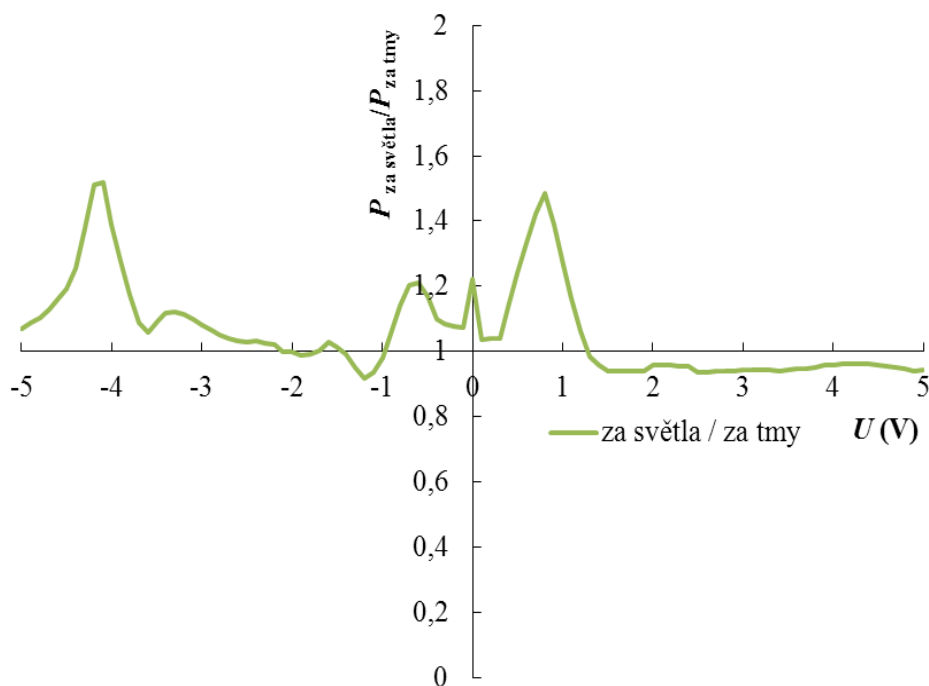


Obr. 31: Závislosti výkonu na napětí pro vzestupné VA charakteristiky vzorku 4C

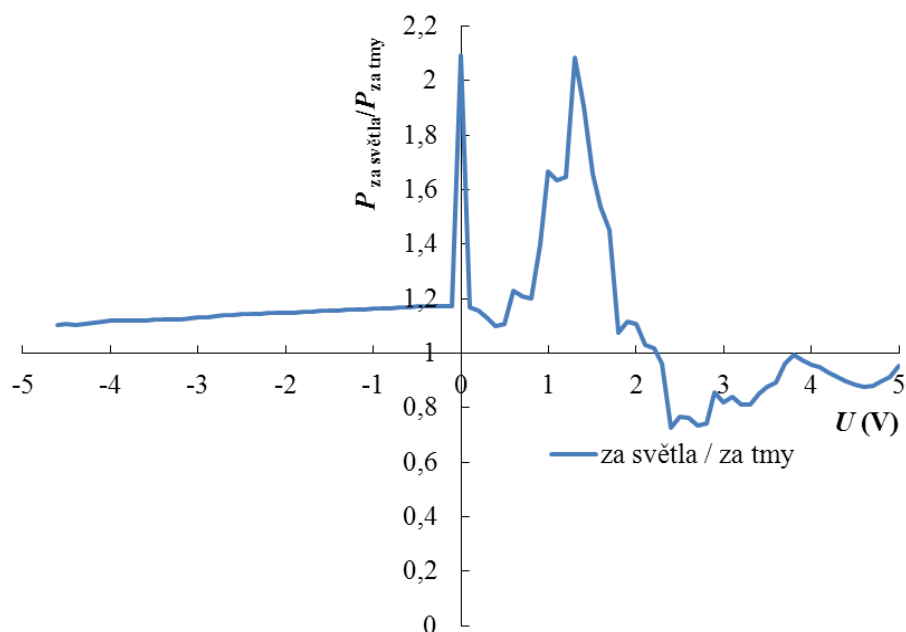


Obr. 32: Závislosti výkonu na napětí pro sestupné VA charakteristiky vzorku 4C

Ze závislostí poměrů výkonu za světla a za tmy na napětí na Obr. 33 a Obr. 34 je zřejmé, že poměr proudu za světla a za tmy je pro záporná napětí v obou grafech většinou větší než 1. Z toho plyne, že kontakt v záporných napětích vykazoval fotovodivost. Pro kladná napětí vykazují závislosti mírnou fotobariéru při napětích pod 2 V, jejíž vliv je menší, než vliv fotovodivosti, proto byl kontakt pro stejnosměrný proud vyhodnocen jako fotovodivý. Největší fotovodivost je pro závislosti vzestupných VA charakteristik při napětích kolem -4 V a 1 V a pro závislosti sestupných VA charakteristik při napětích kolem 1,5 V.



Obr. 33: Závislost poměru výkonu za světla a za tmy na napětí pro vzestupné VA charakteristiky vzorku 4C



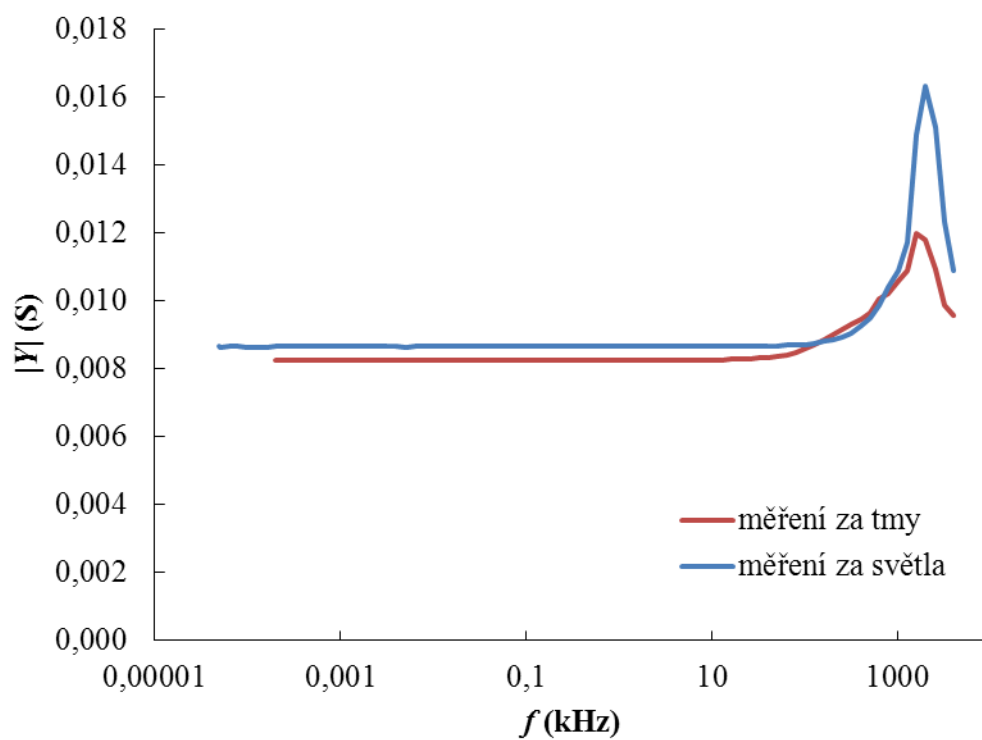
Obr. 34: Závislost poměru výkonu za světla a za tmy na napětí pro sestupné VA charakteristiky vzorku 4C

4.3 Vyhodnocení impedančních spekter vzorku 4C

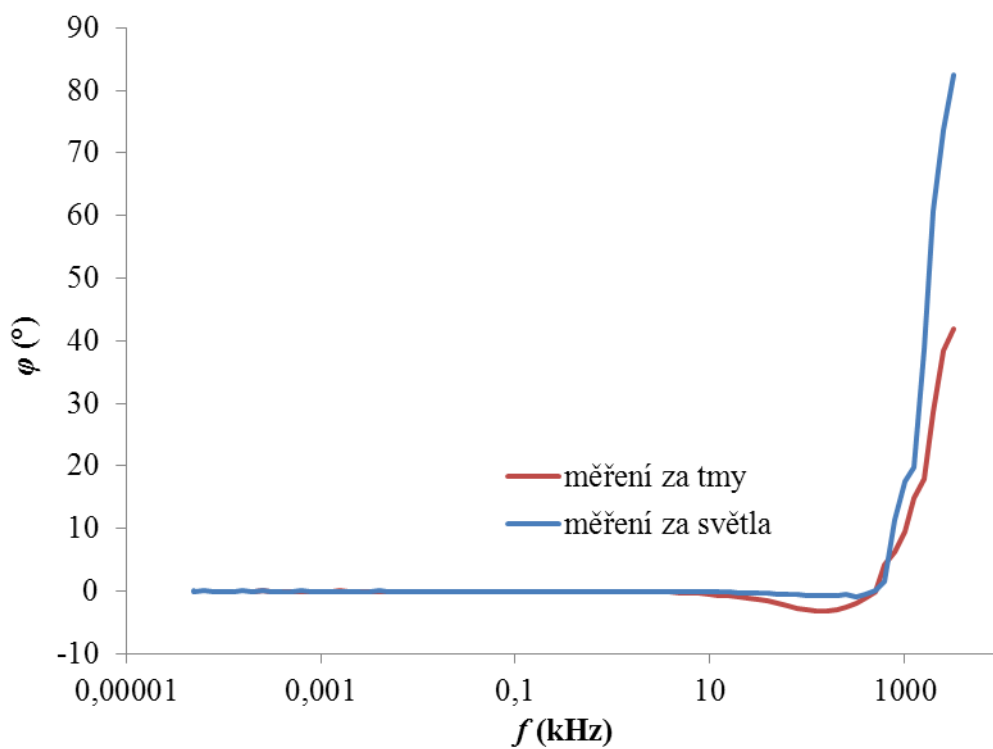
Vztahy definované v kapitole 2.2.5 byly využity k vyhodnocení změřených impedančních spekter ve formě závislostí admitance a fázového posunu na frekvenci střídavého proudu za tmy a za osvětlení vzorků.

Na Obr. 35 jsou závislosti velikosti admitance na frekvenci střídavého proudu. Vzorek 4C měl přibližně 1,05násobné zvětšení velikosti admitance vlivem osvětlení při frekvencích do 100 kHz a až 1,4násobné zvětšení velikosti admitance nad 1 MHz.

Na Obr. 36 jsou závislosti fázového posunu na frekvenci střídavého proudu vzorku 4C. V závislostech je vidět, že posun nastává při frekvencích nad 100 kHz a za osvětlení je přibližně dvojnásobně vyšší, než za tmy. Pro frekvenci přibližně 5 MHz dosahuje fázový posun za světla 90° , což odpovídá kapacitnímu chování, fázový posun 0° odpovídá odporovému chování.



Obr. 35: Závislosti velikosti admitance $|Y|$ na frekvenci vzorku 4C



Obr. 36: Závislosti fázového posunu φ na frekvenci vzorku 4C

Naměřené závislosti byly následně přepočítány na závislosti sériové (C_s) a paralelní (C_p) kapacity na sériové (G_s) a paralelní (G_p) konduktanci pomocí vztahů

$$G_p = |Y| \cos \varphi, \quad C_p = |Y| \frac{\sin \varphi}{\omega}, \quad (21)$$

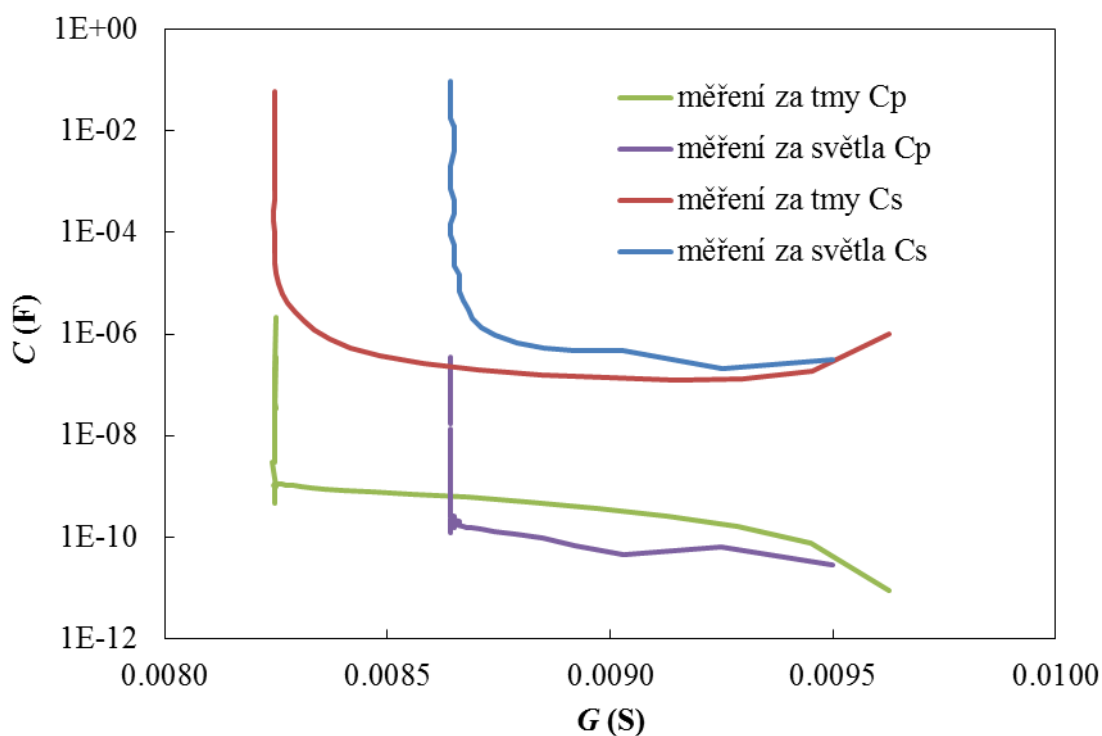
$$G_s = \frac{|Y|}{\cos \varphi}, \quad C_s = \frac{|Y|}{\omega \sin \varphi}, \quad (22)$$

které byly odvozeny ze vztahů v kapitole 2.2.5, kde $B_s = |Y|/\sin \varphi$ je sériová susceptance.

Z Obr. 37 je zřejmé, že kontakt měl při vyšších paralelních kapacitách než 1 nF za světla větší paralelní vodivost, než za tmy a při nižších paralelních kapacitách za světla nižší paralelní vodivost, než za tmy.

Je také zřejmé, že kontakt měl při vyšších sériových kapacitách než 1 μ F za světla větší sériovou vodivost, než za tmy a při nižších paralelních kapacitách mohla být za světla nižší paralelní vodivost, než za tmy.

Maximální dosažené sériové kapacity byly asi o 5 řádů větší, než dosažené paralelní kapacity jak za světla, tak za tmy.



Obr. 37: Závislosti paralelní kapacity na paralelní konduktanci a sériové kapacity na sériové konduktanci vzorku 4C

4.4 Souhrnné výsledky

V tabulce (Tabulka 3) jsou uvedeny souhrnné výsledky vlivu osvětlení na vodivost měřených vzorků z volt-ampérových charakteristik a impedančních spekter při stejnosměrném (DC) a střídavém (AC) proudu: vzorky označené znaménkem „+“ vykazovaly zvýšení vodivosti při

osvětlení (fotovodivost), u vzorků označených „0“ neovlivnilo osvětlení vzorku elektrickou vodivost a u vzorků označených znaménkem „–“, došlo ke snížení vodivosti při osvětlení.

Tabulka 3: Porovnání vodivosti kontaktů 1-5 za světla a za tmy

Vzorek	1		2		3		4		5	
A	0	–	+	+	+	+	+	+	+	+
B	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+
C	+	–	–	–	–	–	+	+	+	+
D	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+
E	+	+	0	0	+	0	+	+	+	+
F	+	–	+	–	+	+	0	+	+	+
	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC

Nejlepší shoda mezi měřením volt-ampérových charakteristik a impedančních spekter byla z tohoto pohledu dosažena u vzorku 5, který měl jako jediný všechny kontakty fotovodivé. Největší fotovodivost byla zaznamenána u vzorku 3B pro AC měření. Většina ostatních vzorků byla také fotovodivá. Jako vzorky s fotobariérou (světlem indukovaným snížení elektrické vodivosti) byly pro stejnosměrná i střídavá měření vyhodnoceny vzorky 2C a 3C. U vzorků 1A, 1C, 1D a 1F byla zaznamenána světlem generovaná bariéra (AC) měření. Odhady poměrů vodivosti za světla a za tmy (koeficientů fotovodivosti) jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka 4*)

Tabulka 4: Odhad poměrů vodivosti za tmy a za světla vzorků 1-5 za světla a za tmy (koeficientů fotovodivosti)

Vzorek	1		2		3		4		5	
A	1	0,9	6	1,1	1,5	5,6	1,05	1,2	1,1	2,6
B	1,4	5,6	1,6	1,5	8	1,2	1	1,3	1,2	1,3
C	1,5	0,55	0,5	0,7	0,2	0,7	1,1	1,05	1,1	1,1
D	1,5	0,08	1,4	10	2,5	1,2	1,3	1,3	1,1	2,6
E	1,3	3	1	---	1,7	1	1,4	1,2	1,1	1,1
F	4,3	0,8	1,3	0,55	1,1	2,6	1	1,5	1,1	1,3
	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC

5 ZÁVĚR

V teoretické části práce jsou nastíněny základy problematiky organických materiálů pro fotovoltaiku, výhody a nevýhody jejich možného využití. Dále jsou uvedeny definice a vztahy pro popis vlastností fotovoltaiických článků a pro dielektrické veličiny, přehled organických materiálů pro fotovoltaiiku a používané metody přípravy tenkých vrstev.

V experimentální části práce jsou uvedeny volt-ampérové charakteristiky a impedanční spektra vzorků organických polovodičů se strukturami ITO/PEDOT:PSS/PdPc:PCBM/Al a ITO/PdPc:PCBM/Al. Volt-ampérové charakteristiky a impedanční spektra byla následně vyhodnocena z hlediska změny vodivosti při osvětlení (viz *Tabulka 3* a *Tabulka 4*). Bylo zjištěno, že vzorky s těmito strukturami byly většinou fotovodivé, ale žádný z nich nevykazoval fotovoltaiický jev. Díky fotovodivosti u nich bylo dosaženo až 5,6násobné zvětšení stejnosměrné vodivosti a až 8násobné zvětšení střídavé vodivosti při nízkých frekvencích. Některé z kontaktů vzorků nevykazovaly fotovodivost nebo vykazovaly světlem indukované snížení elektrické vodivosti (fotobariéry). U vzorků s vrstvou PEDOT:PSS byla větší pravděpodobnost snížení elektrické vodivosti vlivem osvětlení (vzniku fotobariéry), než u vzorků bez ní.

Z mikrofotografií povrchů struktur s PEDOT:PSS a PdPc:PCBM vyplynulo, že struktura aktivních vrstev PdPc:PCBM vykazovala krystalinitu a pro vrstvy PEDOT:PSS jsou zřejmé tiskové stopy.

Měření vlastností vzorků analyzovaných v této práci bylo provedeno již v roce 2013. V tomto roce byly prováděny další experimentální práce na podobných strukturách, jejich výsledky nejsou uvedeny v této práci. Poměrně časově náročná analýza bude provedena v následujícím období.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRABEC, Christoph J. Organic photovoltaics: technology and market. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2004, vol. 83, no. 2-3, pp. 273-292. ISSN 0927-0248. DOI: 10.1016/j.solmat.2004.02.030. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092702480400100X>
- [2] *Agilent Impedance Measurement Handbook* [online]. 2014, poslední revize 10. 9. 2013 [cit. 17. 4. 2014]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>
- [3] *P₃HT - Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) regioregular, electronic grade, 99.995% trace metals basis, average Mn 30,000-60,000* | Sigma-Aldrich [online]. 2013, [cit. 22. 8. 2013]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/698997?lang=en®ion=CZ>
- [4] Irwin, MD., Bulchoz, B., Hains, AW., Chang, RPH., Mark, TJ. p-type semiconducting nickel oxide as efficiency-enhancing anode interfacial layer in polymer bulk-heterojunction solar cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, vol. 105, no. 8, pp. 2783-2787. ISSN 00278424. DOI:10.1073/pnas.0711990105. Dostupné z: <http://www.pnas.org/content/105/8/2783.full?sid=be501768-b7a5-4594-89cb-20e1ca9ccbf8>
- [5] MA, W., C. YANG, X. GONG, K. LEE, A. J. HEEGER. Thermally Stable, Efficient Polymer Solar Cells with Nanoscale Control of the Interpenetrating Network Morphology. *Advanced Functional Materials*. 2005, vol. 15, no. 10, pp. 1617-1622. DOI: 10.1002/adfm.200500211. ISSN 1616-301X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adfm.200500211>
- [6] LIU, Chih-Ming, Chia-Min CHEN, Yu-Wei SU, Shu-Min WANG, Kung-Hwa WEI. The dual localized surface plasmonic effects of gold nanodots and gold nanoparticles enhance the performance of bulk heterojunction polymer solar cells. *Organic Electronics*. 2013, vol. 14, no. 10, pp. 2476-2483. ISSN 1566-1199. DOI: 10.1016/j.orgel.2013.06.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566119913002899>
- [7] *PCBTDPDP Mw 10,000-50,000* | Sigma-Aldrich [online]. 2013, [cit. 22. 8. 2013]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/1754048?lang=en®ion=CZ>
- [8] JO, Jang, David GENDRON, Ahmed NAJARI, Ji Sun MOON, Shinuk CHO, Mario LECLERC, Alan J. HEEGER. Bulk heterojunction solar cells based on a low-bandgap carbazole-diketopyrrolopyrrole copolymer. *Applied Physics Letters*. 2010, vol. 97, no. 20. DOI: 10.1063/1.3508951. ISSN 0003-6951. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/APPLAB/v97/i20/p203303/s1>
- [9] BADROU AÏCH, Réda, Yingping ZOU, Mario LECLERC, Ye TAO. Solvent effect and device optimization of diketopyrrolopyrrole and carbazole copolymer based solar cells. *Organic Electronics*. 2010, vol. 11, no. 6, pp. 1053-1058. ISSN 1566-1199. DOI: 10.1016/j.orgel.2010.03.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S156611991000087X>

- [10] *PCDTBT average Mw 20,000-100,000* | Sigma-Aldrich [online]. 2013, [cit. 31. 8. 2013]. Dostupné z: <<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/753998?lang=en®ion=CZ>>
- [11] SEO, Jung Hwa, Andrea GUTACKER, Yanming SUN, Hongbin WU, Fei HUANG, Yong CAO, Ullrich SCHERF, Alan J. HEEGER, Guillermo C. BAZAN. Improved High-Efficiency Organic Solar Cells via Incorporation of a Conjugated Polyelectrolyte Interlayer. *Journal of the American Chemical Society*. 2011-06-08, vol. 133, no. 22, pp. 8416-8419. ISSN 0002-7863. DOI: 10.1021/ja2037673. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja2037673>
- [12] LIU, Jian, Shuyan SHAO, Gang FANG, Bin MENG, Zhiyuan XIE, Lixiang WANG, Ullrich SCHERF, Alan J. HEEGER, Guillermo C. BAZAN. High-Efficiency Inverted Polymer Solar Cells with Transparent and Work-Function Tunable MoO₃-Al Composite Film as Cathode Buffer Layer. *Advanced Materials*. 2012, vol. 24, no. 20, pp. 2774-2779. ISSN 0935-9648. DOI: 10.1002/adma.201200238. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201200238>
- [13] *MDMO-PPV - Poly[2-methoxy-5-(3';7'-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylenevinylene]* | Sigma-Aldrich [online]. 2013, [cit. 8. 9. 2013]. Dostupné z: <<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/546461?lang=en®ion=CZ>>
- [14] Cen, LC, Godovsky, D., Inganas, O., Hummelen, JC., Janssens, RAJ., Svensson, M., Andersson, RM. Polymer photovoltaics devices from stratified multilayers of donor-acceptor blends. *Advanced materials*. 2002, vol. 12, no. 18, pp. 1367-1370, ISSN. 0935-9648. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-4095%28200009%2912:18%3C1367::AID-ADMA1367%3E3.0.CO;2-Z/pdf>
- [15] BRABEC, Christoph J., Sean E. SHAHEEN, Christoph WINDER, N. Serdar SARICIFTCI, Patrick DENK. Effect of LiF/metal electrodes on the performance of plastic solar cells. *Applied Physics Letters*. 2002, vol. 80, no. 7, pp. 1288-1290. ISSN 0003-6951. DOI: 10.1063/1.1446988. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/APPLAB/v80/i7/p1288/s1>
- [16] QU, Sanyin, Bing WANG, Fuling GUO, Jing LI, Wenjun WU, Cong KONG, Yitao LONG, Jianli HUA. New diketo-pyrrolo-pyrrole (DPP) sensitizer containing a furan moiety for efficient and stable dye-sensitized solar cells. *Dyes and Pigments*. 2012, vol. 92, no. 3, pp. 1384-1393. ISSN 0143-7208. DOI: 10.1016/j.dyepig.2011.09.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143720811002609>
- [17] *Ruthenium-based dyes for Dye Solar Cells* | Sigma-Aldrich [online]. 2013, [cit. 10. 9. 2013]. Dostupné z: <<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/dye-solar-cells.html>>
- [18] HO, Ping-Yi, Jen-Yu SUN, Shao-Hsuan KAO, Chia-Yu KAO, Shang-Hong LIN, Shiang LAN, Wei-Hsuan TSENG, Chih-I WU, Ching-Fuh LIN. The effects of MoO₃ treatment on inverted PBDTTT-C: PC71BM solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2013, vol. 119, pp. 235-240. ISSN 0927-0248. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.07.048. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024813003942>

- [19] DU, Xiaoyan, Dan HE, Zuo XIAO, Liming DING. The double-edged function of UV light in polymer solar cells with an inverted structure. *Synthetic Metals*. 2012, vol. 162, no. 24, pp. 2302-2306. ISSN 0379-6779. DOI: 10.1016/j.synthmet.2012.10.022. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677912003785>
- [20] GROBOSCH, M., C. SCHMIDT, R. KRAUS, M. KNUPFER. Electronic properties of transition metal phthalocyanines: The impact of the central metal atom (d5–d10). *Organic Electronics*. 2010, vol. 11, no. 9, pp. 1483-1488. ISSN 1566-1199. DOI: 10.1016/j.orgel.2010.06.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566119910001941>
- [21] TAKEDA, Akihiro, Takeo OKU, Atsushi SUZUKI, Tsuyoshi AKIYAMA, Yasuhiro YAMASAKI. Fabrication and characterization of fullerene-based solar cells containing phthalocyanine and naphthalocyanine dimers. *Synthetic Metals*. 2013, vol. 177, pp. 48-51. ISSN 0379-6779. DOI: 10.1016/j.synthmet.2013.06.011. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677913002968>
- [22] TRESS, Wolfgang, Karl LEO a Moritz RIEDE. Effect of concentration gradients in ZnPc: C60 bulk heterojunction organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, vol. 95, no. 11, pp. 2981–2986. ISSN 0927-0248. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.06.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092702481100328X>
- [23] *BPhen | Bathophenanthroline 97% | Sigma-Aldrich* [online]. 2013, [cit. 13. 9. 2013]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/133159?lang=en®ion=CZ>
- [24] KIM, Inho, Hanna M. HAVERINEN, Jian LI, Ghassan E. JABBOUR. Enhanced power conversion efficiency of p-i-n type organic solar cells by employing a p-layer of palladium phthalocyanine: C60 bulk heterojunction organic solar cells. *Applied Physics Letters*. 2010, vol. 97, no. 20. ISSN 0003-6951. DOI: 10.1063/1.3507387. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/APPLAB/v97/i20/p203301/s1>
- [25] *Bathocuproine 96% | Sigma-Aldrich* [online]. 2013, [cit. 13. 9. 2013]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/140910?lang=en®ion=CZ>
- [26] ZHU, X.Z., C.H. GAO, M.F. XU, W. GU, X.B. SHI, Y.L. LEI, Z.K. WANG, L.S. LIAO. Enhancement of device efficiency in CuPc/C60 based organic photovoltaic cells by inserting an InCl3 layer: C60 bulk heterojunction organic solar cells. *Synthetic Metals*. 2012, vol. 162, no. 24, pp 2212–2215. ISSN 0379-6779. 2212-2215. DOI: 10.1016/j.synthmet.2012.10.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677912003773>
- [27] NEGHABI, Mina, Mehdi ZADSAR, Seyed Mohammad Bagher GHORASHI. Investigation of structural and optoelectronic properties of annealed nickel phthalocyanine thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2014, vol. 17, pp. 13-20. ISSN 1369-8001. DOI: 10.1016/j.mssp.2013.08.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369800113002400>

- [28] CHANG, Hao, Pengyue WANG, Haidong LI, Jidong ZHANG, Donghang YAN. Solvent vapor assisted spin-coating: A simple method to directly achieve high mobility from P3HT based thin film transistors. *Synthetic Metals*. 2013, vol. 184, pp. 1-4. ISSN 0379-6779. DOI: 10.1016/j.synthmet.2013.09.031. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379677913004530>
- [29] PARK, Joonhyung, Sangwoon LEE, Hong H. LEE, Jidong ZHANG, Donghang YAN. High-mobility polymer thin-film transistors fabricated by solvent-assisted drop-casting: A simple method to directly achieve high mobility from P3HT based thin film transistors. *Organic Electronics*. 2006, vol. 7, no. 5, pp. 256-260. ISSN 1566-1199. DOI: 10.1016/j.orgel.2006.03.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566119906000516>
- [30] KIM, Kukjoo, Sung Il AHN, Kyung Cheol CHOI. Direct fabrication of copper patterns by reactive inkjet printing. *Current Applied Physics*. 2013, vol. 13, no. 9, pp. 1870-1873. ISSN 1567-1739. DOI: 10.1016/j.cap.2013.07.021. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1567173913002861>
- [31] LEE, Taik-Min, Hyun-Suk HAN, Bongmin KIM, Sun-Woo KWAK, Jae-Ho NOH, Inyoung KIM. Roll offset printing process based on interface separation for fine and smooth patterning. *Thin Solid Films*. 2013, vol. 548, pp. 566-571. ISSN 0040-6090. DOI: 10.1016/j.tsf.2013.09.023. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609013014910>
- [32] KWAK, Moon Kyu, Kyu Ho SHIN, Eung Yeoul YOON, Kahp Y. SUH, Jae-Ho NOH, Inyoung KIM. Fabrication of conductive metal lines by plate-to-roll pattern transfer utilizing edge dewetting and flexographic printing. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2010, vol. 343, no. 1, pp. 301-305. ISSN 0021-9797. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.11.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021979709014234>
- [33] LEE, Taik-Min, Yong-Jung CHOI, Su-Yong NAM, Choon-Woo YOU, Dae-Yup NA, Hyeon-Cheol CHOI, Dong-Youn SHIN, Kwang-Young KIM, Kwang-Il JUNG. Color filter patterned by screen printing. *Thin Solid Films*. 2008, vol. 516, no. 21, pp. 7875-7880. ISSN 0040-6090. DOI: 10.1016/j.tsf.2008.05.044. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040609008006160>
- [34] QIN, Pingli, Guojia FANG, Wei ZENG, Xi FAN, Qiao ZHENG, Fei CHENG, Jiawei WAN, Xingzhong ZHAO. Influence of thermal radiation during aluminum thermal evaporation on organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, vol. 95, no. 12, pp. 3311-3317. ISSN 0927-0248. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.07.019. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024811004223>
- [35] IVANOV, N., V. PAPERNY, A. RZHECHITSKY, A. LOPATIN, B. KIM CHUL, B. KIM MUN, Jiawei WAN, Xingzhong ZHAO. Fabrication of a new type of optical medium with metallic nanolayers by ion implantation technique and vacuum evaporation. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 201, no. 19-20, pp. 8263-8266. ISSN 0257-8972. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.147. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025789720700271X>

- [36] *OLED and OPV components and substrate systems for fabrication including ITO substrates and evaporation masks* [online]. 2014, [cit. 25. 2. 2014]. Dostupné z: <http://www.ossila.com/oled_opv_ofet_catalogue3/OLED_OPV_Substrates/OLED_OPV_substrates_equipment.php>
- [37] *PEDOT:PSS AI4083 from Ossila for use with OPVs and OLEDs* [online]. 2014, [cit. 2. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.ossila.com/oled_opv_ofet_catalogue3/PCDTBT_P3HT_PCBM_PEDOT_PSS_for_organic_photovoltaics/M121-PEDOT-PSS%28AI%204083%29.php>
- [38] *Substrate Packs- Pixelated Anode substrate system - Organic Photovoltaic and OLED ITO substrates and fabrication equipment-* [online]. 2014, [cit. 25. 2. 2014]. Dostupné z: <http://www.ossila.com/oled_opv_ofet_catalogue3/OLED_OPV_Substrates/S103-Substrate_Packs.php>
- [39] *Instruments Products | Bioscience : ECLIPSE E200* [online]. 2014, [cit. 23. 4. 2014]. Dostupné z: <<http://nikon.com/products/instruments/lineup/bioscience/biological-microscopes/upright/e200/index.htm>>
- [40] *Nikon Europe B.V. - Starší; produkty - Digital Cameras - 2012 - D5000 - Digital Cameras, D-SLR, COOLPIX, NIKKOR Lenses* [online]. 2014, [cit. 21. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.nikon.cz/cs_CZ/product/discontinued/digital-cameras/2012/d5000>
- [41] *Light sources for solar simulation* [online]. 2014, [cit. 21. 4. 2014]. Dostupné z: <<http://www.keithley.com/data?asset=51992>>
- [42] *Electrometer/High Resistance Meter* [online]. 2014, [cit. 22. 4. 2014]. Dostupné z: <http://www.lot-oriel.com/files/downloads/lightsources/eu/sun-simulation/LQ_Solar_simulator_eu.pdf>
- [43] *1260 Impedance/gain-phase Analyzer* [online]. 2014, [cit. 21. 4. 2014]. Dostupné z: <<http://www.solartronanalytical.com/download/Model-1260A.pdf>>
- [44] *1296 Dielectric Interface* [online]. 2014, [cit. 21. 4. 2014]. Dostupné z: <<http://www.solartronanalytical.com/download/Model-1296A-Dielectric-Interface-System.pdf>>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AC	střídavý proud (alternating current)
AlPc	ftalocyanin hliníku
AM 1.5G	simulované sluneční spektrum
A_{ox}	oxidační potenciál donoru
B, B_p, B_s	susceptance obecná, paralelní a sériová
BCP	Bathokuproin
Bphen	Bathofenantrolin (4,7-Difenyl-1,10-phenanthrolin)
C, C_s, C_p	elektrická kapacita obecná, sériová a paralelní
CPE	konjugovaný polyelektrolyt
CS ₂	disulfid uhlíku
CuPc	ftalocyanin mědi
C ₆₀	fulleren obsahující 60 uhlíků
D	ztrátový faktor
DC	stejnoseměrný proud (direct current)
DPP	diketo-pyrrolo-pyrrole
DPP2	5-[4-[3-[4-(4-(N, N-bis(4-methoxyfenyl) amino)fenyl)fenyl]-2,5-di-n-butyl-pyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dion] fenyl]benzen-2-karbaldehyd
EQE	poměr počtu párů elektron-díra na výstupech polovodiče a fotoexcitací
$E_{red(A)}$	redukční potenciál akceptoru
f	frekvence střídavého proudu
FF	faktor plnění (fill factor)
FTO	fluorem dopovaný SnO ₂
G, G_p, G_s	konduktance obecná, paralelní a sériová
HOMO	nejvyšší obsazený molekulový orbital (highest occupied molecular orbital)
IS	impedanční spektrum
I, I_0, I_{sc}	elektrický proud obecný, saturační a nakrátko
I_{light}	intenzita dopadajícího světla
ITO	směs oxidů In ₂ O ₃ a SnO ₂ typicky v poměru 9:1 (indium-tin oxide)
j	imaginární jednotka
J_{sc}	proudová hustota nakrátko (proudová hustota při zkratu)
k	Boltzmanova konstanta
kT/q	teplotní potenciál

L	indukčnost cívky
LCD	displej z tekutých krystalů
LUMO	nejnižší neobsazený molekulový orbital (lowest unoccupied molecular orbital)
M	faktor vyjadřující spektrální nesoulad mezi výstupním spektrem solárního simulátoru a standardním AM1.5 spektrem
MDMO-PPV	Poly[2-metoxy-5-(3',7'-dimetyloxy)-1,4-fenylenvinylen]
MeO-TPD	(N4,N4,N4',N4'- <i>tetrakis</i> (4- <i>metoxyfenyl</i>)-[1,1'- <i>bifeny</i> l]-4,4'- <i>diamine</i>)
M_n	početně průměrná molární hmotnost
M_w	hmotnostně průměrná molární hmotnost
n	faktor ideality diody
n_e, n_h	elektronová a děrová hustota
N_c, N_v	efektivní hustoty energetických stavů vodivostního a valenčního pásu
NiPc	ftalocyanin niklu
N-719	Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiokyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dikarboxylato)ruthenium(II)
OFET	organický polem řízený tranzistor (organic field effect transistor)
OLED	organická světlo vyzařující dioda (organic light emitting diode)
$P, P_{in}, P_{out},$	
P_{light}	výkon obecný, vstupního záření solárního simulátoru, výstupní solárního článku a dopadajícího světla
OPV	organický solární článek (organic photovoltaics device)
PBDTTT-C	Poly[(4,8-bis-(2-ethylhexyloxy)-benzo[1,2-b:4,5-b']dithiofen)-2,6-diyl alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b]thiofen))-2,6-diyl]
PCBM	fenyl- C_{61} -methylester kyseliny máselné (phenyl- C_{61} -butyric acid methyl ester)
PCBTDP	poly[<i>N</i> -90-heptadecanyl-2,7-carbazol- <i>alt</i> -3,6-bis(thiofen-5-yl)-2,5 dioctyl-2,5-dihydropyrrolo[3,4]pyrrole-1,4-dion]
PCDTBT	poly[<i>N</i> -9'-heptadecanyl-2,7-carbazol- <i>alt</i> -5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazol)], Poly[[9-(1-oktylnonyl)-9H-carbazole-2,7-diyl]-2,5-thiofendiyl-2,1,3-benzothiadiazol-4,7-diyl-2,5-thiofenediyl]
PCE	účinnost fotovoltaiické přeměny (power conversion efficiency)
PC ₇₁ BM	fenyl- C_{71} -methylester kyseliny máselné (phenyl- C_{71} -butyric acid methyl ester)
PdPc	ftalocyanin paladia
PEDOT:PSS	polymerní směs 3,4-ethylendioxythiofenu a polystyrensulfonátu
PLED	polymerní světlo vyzařující dioda (polymer light emitting diode)
POPT	poly(3-(4-octyl-fenyl)thiofen)

PTCDI-C ₆	perylen tetrakarboxylový diimid-hexyl
PF2/6-b-	
P3BMATCH	poly(9,9-bis(2-ethylhexyl)-fluoren]-b-poly[3-(6-trimethylammoniumhexyl)thiofen]
P ₃ HT	Poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl)
R , R_s , R_p	rezistance (odpor) obecná, sériová, paralelní
S_1 , S_2 , S_3 , S_4	korelační konstanty
SCLC	proud omezený prostorovým nábojem (space charge limited current)
T	termodynamická teplota
UV	ultrafialové
THF	tetrahydrofuran
U_{OC}	napětí naprázdno (napětí při nulovém odběru proudu)
VA	volt-ampérová
X , X_P , X_S	reaktance obecná, paralelní a sériová
X_C , $ Z_C $	kapacitance
X_L , $ Z_L $	induktance
Y	admittance
Z	impedance
Z_R	impedance ideálního rezistoru
ZnPc	ftalocyanin zinku
ε_C , ε_V	energie vodivostního a valenčního pásu
ε_{FC} , ε_{FV}	energie elektronové a děrové kvazi-Fermiovy hladiny
φ	fázový posun
Φ_{M1} , Φ_{M2}	výstupní práce katody a anody
ω	fázová rychlost